

W. A. HOLM

**LA TELEVISIONE A
COLORI**

SENZA MATEMATICA

EDIZIONI C.E.L.I.

**BIBLIOTECA
TECNICA
PHILIPS**



BIBLIOTECA TECNICA PHILIPS

LA TELEVISIONE A COLORI

SENZA MATEMATICA

W. A. Holm

1 9 7 2

EDIZIONI - C. E. L. I. - BOLOGNA

VIA GANDINO, 1

Questo libro è stato pubblicato anche
nelle lingue olandese, francese e inglese.

Traduzione del dr. ROMANO ROSATI

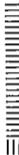
Copyright © N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken
Eindhoven, Olanda, 1967

© Edizione italiana - C.E.L.I. - Bologna - 1972

I diritti di pubblicazione per questa edizione sono concessi dalla N.V. Philips' Gloeilampenfabrieken, Eindhoven, Olanda, alle Edizioni C.E.L.I. di Bologna, Italia. Non diamo alcuna assicurazione o garanzia che la materia esposta nel presente libro sia esente da diritti di brevetto; nulla di ciò che è pubblicato deve essere interpretato come un accordo tacito o in altro modo una licenza sui brevetti, qualunque essi siano.

Stampato in Italia

Tipografia Babina - Bologna



P R E F A Z I O N E



Questo libro ha lo scopo non solamente di descrivere le basi teoriche della televisione a colori, ma anche di far meglio conoscere o di rendere comprensibile ad un pubblico numeroso la soluzione dei problemi, alcuni dei quali molto complicati, che si sono incontrati nella realizzazione della televisione a colori. Sotto questo aspetto, quest'opera colma una lacuna nella letteratura specializzata, poiché ciò che un lettore cerca non è una spiegazione scientificamente precisa di un dato problema in tutti i suoi elementi importanti ed interessanti, ma un libro che sia esente da inutili digressioni, comprensibile alla totalità dei lettori.

Quest'opera interessa in primo luogo i tecnici radio e televisivi addetti al progetto e alla riparazione di apparati televisivi a colori, oltre che gli studenti delle scuole professionali e tutti coloro che si occupano di televisione, sia sul piano tecnico che sul piano commerciale, o anche come telespettatori, e che desiderano sviluppare le loro conoscenze. Per questi lettori basta conoscere le basi della televisione a bianco e nero, dato che il libro non richiede conoscenze speciali di fisica e di matematica.

Nel presente libro, sono state aggiunte alcune considerazioni sulla parte più difficile dell'argomento, il sistema di trasmissione: negli Stati Uniti e in Giappone numerose stazioni emettono programmi televisivi a colori. I due paesi utilizzano lo stesso sistema di trasmissione, sviluppato nel 1951 dal National Television System Committee americano (NTSC) e che è descritto nel presente libro.

In Europa si è cercato per molto tempo di stabilire una norma di televisione a colori europea da valere per tutte le nazioni. Ciò in quanto l'esperienza pratica acquisita negli Stati Uniti aveva rivelato alcuni inconvenienti del sistema NTSC.

I grandi laboratori europei hanno cercato con molto impegno possibili miglioramenti. Due sviluppi interessanti sono stati messi a punto, in Francia il sistema SECAM e in Germania il sistema PAL.

Il primo è teoricamente più semplice del sistema NTSC normale, mentre il secondo è un po' più complicato. Benché questo libro tratti soprattutto le basi del sistema NTSC, in appendice sono descritte le principali modifiche ed aggiunte che si hanno negli altri due sistemi. La decisione di scegliere fra questi tre sistemi per le singole nazioni è stata attribuita ai rispettivi governi, dato che non è stato possibile raggiungere un accordo per un sistema televisivo a colori, unico per tutta l'Europa.



I N D I C E



	pag.
Prefazione	V
Cap. I. Teoria fondamentale	1
Luce e colore	1
Il miscuglio dei colori	2
Miscuglio sottrattivo di colori	5
Miscuglio additivo di colori	6
Colori primari e componenti cromatiche	8
La curva di luminosità relativa	11
Il diagramma di cromaticità	14
Espressioni e grandezze utilizzate nella tecnica dell'illuminazione	18
Cap. II. Apparecchiature di ripresa televisiva a colori	24
Principio costruttivo	24
La telecamera	25
Il discriminatore dei colori	25
Specchi dicroici	28
Realizzazione pratica del discriminatore dei colori	34
Obbiettivi delle telecamere, lenti ausiliarie	35
I tubi di ripresa	40
Il gamma totale del sistema	42
Sovrapposizione dei colori	47
Il banco di controllo	50

	pag.
Cap. III. Sistemi di riproduzione	52
Il sistema a sequenza di colori	52
Inconvenienti del sistema a sequenza di colori	54
Il sistema simultaneo	56
Il tubo a maschera	57
Convergenza statica	60
Convergenza dinamica	61
Purezza dei colori	64
Costruzione generale del cinescopio a maschera	67
Sistema di proiezione televisiva a colori	70
Cap. IV. Il sistema di trasmissione	72
Il segnale di luminanza Y	72
Interlacciamento di frequenza	74
Il segnale di crominanza	81
Demodulazione del segnale di crominanza	92
I segnali I e Q	92
Le fasi dei colori	98
Considerazioni finali	104
Appendice Il sistema SECAM	107
Il sistema PAL	117



CAPITOLO I.

TEORIA FONDAMENTALE



Luce e colore.

Newton, cercando di scoprire la natura della luce, ebbe per primo la concezione, molto rivoluzionaria, che la luce bianca del sole non è una luce così pura come potrebbe sembrare, ma al contrario è un miscuglio omogeneo di un numero infinito di colori e di tinte intermedie dell'arcobaleno, che vanno dal violetto al rosso, passando per il blu, il verde e il bianco. Questa concezione temeraria, e per allora neanche ben fondata, era basata sulla osservazione, per sua natura molto semplice, che consisteva nel far passare un raggio luminoso attraverso una stretta fenditura facendogli attraversare in seguito un prisma triangolare di vetro (Fig. 3). In queste condizioni il raggio uscente dal prisma non presenta più l'aspetto di una sottile linea bianca, ma al contrario assume l'aspetto di una successione continua dei colori citati poco avanti e di altre tinte intermedie, sotto forma di un fascio divergente.

Benché Newton non poté dare spiegazioni soddisfacenti delle differenti rifrazioni fra i diversi colori quando la luce bianca attraversa un prisma di vetro e, tanto meno, poté darne una spiegazione basata sulla sua teoria delle particelle luminose (teoria corpuscolare della luce), la sua definizione che la luce bianca è un miscuglio di un numero infinito di colori puri è rimasta valida fino ai nostri giorni. Fu Huygens a dare la risposta al problema posto dalle variazioni di rifrazione attraverso il prisma di vetro, poiché egli fu il primo a considerare la luce come un fenomeno ondulatorio, con lunghezze d'onda estremamente corte.

Secondo Huygens, la sola differenza tra i differenti colori consiste nelle loro lunghezze d'onda: quelli dell'estremità rossa dell'arcobaleno hanno lunghezze d'onda maggiori, e quelli dell'estremità violetta hanno lunghezze d'onda minori.

Se si suppone che la luce, nei mezzi ottici come il vetro, si propaghi più lentamente rispetto al vuoto e, inoltre, che si propaghi più lentamente quanto minore è la lunghezza d'onda, si può facilmente spiegare il perché, quando la luce bianca cade obliquamente sopra un mezzo ottico, le parti blu e violette (lunghezze d'onda più corte) sono rifratte maggiormente rispetto alle parti gialla e rossa, di maggiori lunghezze d'onda.

Durante trecento anni la teoria ondulatoria postulata da Huygens subì un'opposizione ostinata dai sostenitori della teoria corpuscolare newtoniana; dato che le varie esperienze erano in favore ora dell'una, ora dell'altra teoria.

Solo durante gli ultimi decenni è diventato possibile, mediante la teoria quantistica, spiegare esattamente, anche se sotto forma astratta, la natura misteriosa della luce, la quale si manifesta sotto due aspetti sostanzialmente differenti.

Per lo scopo che noi ci siamo profisso, basterà dire che la luce è una forma di energia analoga a quella dei campi elettromagnetici e la si può descrivere, nel caso di questi ultimi, come un fenomeno ondulatorio. Tuttavia, mentre la gamma delle lunghezze d'onda dei campi elettromagnetici (o onde radio, come generalmente vengono chia-

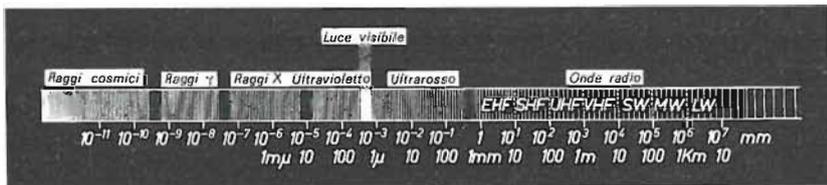


Figura 1. - Scala delle lunghezze d'onda delle oscillazioni elettromagnetiche.

mate) si estende da una frazione di millimetro a circa 10.000 m, le lunghezze d'onda della luce visibile coprono una gamma relativamente stretta, che va da circa 700 nm per la luce rossa a circa 400 nm per la violetta ⁽¹⁾. Benché tali lunghezze d'onda ci sembrino già molto corte, i raggi X ed i raggi cosmici hanno lunghezze d'onda ancora più corte. La Fig. 1 rappresenta schematicamente la totalità dello spettro

⁽¹⁾ Un nm (nanometro) = 1 milionesimo di mm. Questa unità, ormai legale, si sostituisce a quelle che venivano finora utilizzate, e più in particolare al milimicron (mμ) e all'Angström (1 Å = 0,1 nm).

tro delle onde elettromagnetiche allo stato attuale delle nostre conoscenze; la parte dello spettro che ci interessa (la luce visibile) è riprodotta separatamente nella Fig. 4. Questo diagramma ci permette di dedurre alcune conclusioni importanti.

Il miscuglio dei colori.

Ciascun punto sulla scala delle lunghezze d'onda corrisponde naturalmente ad una data lunghezza d'onda e ognuna di queste viene percepita dall'occhio come una certa tinta o colore. Praticamente, tutti questi colori sono presenti nella luce bianca del sole. La differenza di lunghezza d'onda (e quindi anche la differenza fra due colori contigui sulla scala) è infinitamente piccola e l'occhio umano non può apprezzarla, ma è il numero infinitamente grande di lunghezze d'onda contenute nello spettro che dà luogo alla successione dei colori dal violetto al rosso, passando attraverso il blu, il verde ed il giallo. Ogni colore distinto è denominato colore *spettrale* e questi colori spettrali vengono percepiti dall'occhio come colori più puri, più brillanti o più « saturi ». Essi non possono essere riprodotti esattamente da alcuno dei metodi classici, come per esempio la stampa o la pittura; essi esistono solo come componenti spettrali della luce bianca prodotti per rifrazione o, individualmente, quando essi caratterizzano la luce emessa dai vapori o dai gas incandescenti (ad esempio, le radiazioni gialle del vapore di sodio, che corrispondono a 589 e 589,6 nm. vedi Fig. 4).

Indipendentemente da questi colori spettrali o saturi, che non possono in generale essere osservati se non in laboratorio, vi è in natura un'infinita varietà di colori non saturi, o miscugli di colori, che noi percepiamo continuamente nella nostra vita quotidiana. Questi colori sono caratterizzati dal fatto che la loro luce non è costituita da un'unica lunghezza d'onda, ma da molte, nella maggior parte dei casi da un numero grandissimo. In questo senso, possiamo immediatamente distinguere tre casi comuni:

- a) Un gruppo molto largo di lunghezze d'onda adiacenti (Fig. 2a) dà l'impressione di colori impuri alterati.
- b) La presenza di tutto lo spettro, più o meno uniformemente ripartito, dove un gruppo di lunghezze d'onda è accentuato (Fig. 2b) dà l'impressione di un colore dolce, pastello.

- c) Due o più gruppi adiacenti, ma indipendenti, di lunghezze d'onda (Fig. 2c) danno anch'essi l'impressione di un solo colore, che si presenta sia come un noto colore dello spettro, più o meno temperato, sia come un nuovo colore che non esiste nello spettro, come ad esempio i colori porpora (miscuglio di rosso e di violetto).

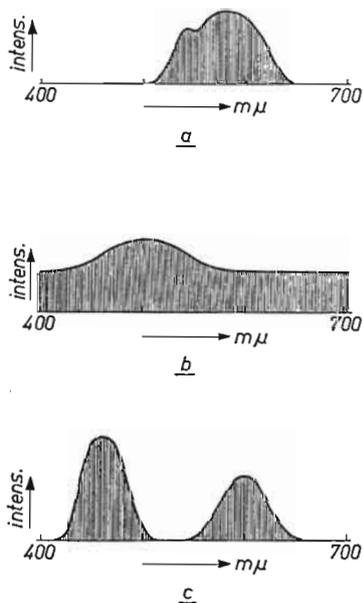


Figura 2. - Distribuzione delle intensità delle lunghezze d'onda spettrali che producono differenti sensazioni visive di colore:

- a) verde giallastro non saturo o impuro,
 b) verde bluastrato opaco,
 c) lunghezze d'onda che producono una nuova sensazione di colore più o meno saturo.

È precisamente quest'ultimo caso che è alla base non solamente delle tecniche della pittura e della stampa a colori ma anche della fotografia e della televisione a colori.

Ciò che noi vediamo nella Fig. 2c sotto forma alquanto astratta non è altro che la rappresentazione del fenomeno ben conosciuto da tutti e portato alla perfezione dai grandi maestri del colore, secondo cui un miscuglio di due colori ne produce un terzo, differente; ed è così che il giallo e il blu danno il verde, il rosso e il blu danno il vio-

letto; il giallo e il rosso danno l'arancio ecc. Questo metodo di miscuglio è detto sottrattivo e ora vedremo la ragione di tale denominazione.

Miscuglio sottrattivo dei colori

Sappiamo che una sensazione di colore è prodotta dagli oggetti o materie opache, per il fatto che quando la luce bianca cade su essi, la loro superficie non riflette la totalità della luce in maniera uniforme per tutte le lunghezze d'onda; solo un certo gruppo di queste lunghezze d'onda viene riflesso, mentre tutte le altre vengono assorbite dalla superficie (e convertite in calore o in altra forma di energia). L'oggetto viene così visto con il colore che corrisponde alle lunghezze d'onda che non vengono assorbite ma riflesse. Per esempio, una mela rossa assorbe il violetto, il blu, il verde e l'arancio e riflette soltanto il rosso. Un oggetto ci sembrerà nero quando assorbe tutta la luce visibile, e grigio quando tutte le lunghezze d'onda sono uniformemente, ma debolmente, riflesse mentre la maggior parte della luce incidente viene assorbita.

Nei miscugli di colori destinati alla stampa e alla pittura si utilizzano sostanze che possiedono le qualità riflettenti necessarie. I pigmenti gialli assorbono il violetto, il blu, il verde, l'arancio e il rosso, e così riflettono soltanto il giallo. Analogamente, i pigmenti blu assorbono il violetto, il verde, il giallo, l'arancio e il rosso, e riflettono soltanto il blu.

Se si mescolano intimamente due pigmenti giallo e blu, aventi colori puri saturi che riflettano solo una banda molto stretta di lunghezze d'onda, il risultato ci apparirà nero. Il debole residuo dello spettro non assorbito da uno dei pigmenti verrà assorbito dall'altro. Si deve però notare che i pigmenti abituali non hanno un tale grado di purezza o di saturazione, dato che riflettono una banda di lunghezze d'onda piuttosto larga. E così il pigmento giallo riflette parti apprezzabili dei colori spettrali vicini verde e arancio; analogamente, i pigmenti blu riflettono un po' di verde e di violetto. Come si vede, il verde è il solo colore dello spettro che viene riflesso dai due pigmenti. Questa è la ragione per la quale il miscuglio di un pigmento giallo con un pigmento blu dà il verde.

Se si mescolano insieme più di due pigmenti, le possibilità di riflessioni di una data banda di lunghezza d'onda diviene molto più debole. In generale, il miscuglio diviene tanto più scuro quanto maggiore è

il numero di colori individuali che esso contiene, dato che ogni pigmento aggiunto sottrae dallo spettro un'altra banda di lunghezze d'onda. La Fig. 5a rappresenta questo miscuglio di pigmenti per i tre colori rosso, verde e blu. Si tenga presente inoltre che nel lavoro pratico in pittura e nella stampa un tale miscuglio di colori è meno semplice di quello che si potrebbe supporre secondo l'esempio precedente, poiché a fianco del miscuglio sottrattivo si trova anche un miscuglio additivo. Il paragrafo che segue ci mostrerà cosa si intende con quest'ultima espressione.

Miscuglio additivo di colori.

Indipendentemente dal metodo sottrattivo di miscuglio dei colori, il metodo *additivo* di miscuglio delle luci colorate ha una importanza particolare in televisione. Questa espressione si applica quando al posto dei pigmenti si mescolano due o più luci di differenti colori; si ha un miscuglio additivo quando la luce che proviene dalle sorgenti considerate è proiettata per esempio su un unico schermo, sul quale l'occhio percepisce il risultato ottenuto. In questo caso, si può dire che questo risultato non è abituale, poiché il colore riflesso dallo schermo *non ha nulla in comune con il colore di una qualsiasi delle sorgenti*.

Contrariamente al miscuglio sottrattivo, è assolutamente impossibile determinare dallo spettro delle lunghezze d'onda il colore che sarà riflesso. Per esempio, il miscuglio di luce verde e di luce rossa dà il giallo e un miscuglio di rosso e di blu dà un porpora, che non esiste nello spettro naturale e al quale non si può dunque attribuire una larghezza d'onda particolare.

La Fig. 5b espone questi fenomeni additivi per il rosso, il verde e il blu. Se confrontiamo fra loro le Figg. 5a e b, il risultato che più colpisce è probabilmente il fatto che quando si mescolano pigmenti rosso, verde e blu, otteniamo il nero, cioè non abbiamo alcuna riflessione, mentre un miscuglio di luci degli stessi colori dà il bianco o, per esprimerci più correttamente, l'occhio riceve una sensazione di bianco. Ciò non è strano poiché, come ha fatto notare Newton, la luce bianca non è un'entità indipendente, ma è la sensazione combinata, percepita dalla retina, degli stimoli che le provengono da tutti i colori dell'arcobaleno.

Numerose esperienze hanno provato che è possibile simulare la luce bianca utilizzando sorgenti luminose di due soli colori, e non

solo con due colori specifici ma con una varietà infinita di tali coppie. Per esempio, a ogni lunghezza d'onda nella parte rossa dello spettro, corrisponde una certa lunghezza d'onda nel blu-verde che, mescolata alla prima, fornisce la sensazione visiva di luce bianca; per ogni lunghezza d'onda nel giallo ve ne è una nel blu che produce lo stesso effetto, e così via. La sola condizione necessaria affinché questo fenomeno abbia luogo è che le intensità dei due raggi luminosi abbiano un rapporto determinato. Tali coppie di colori, che danno luogo all'impressione visiva di bianco quando vengono mescolati additivamente, vengono denominati *colori complementari*.

Implicitamente abbiamo detto che per simulare la luce bianca con due sorgenti luminose complementari, è necessario che le intensità siano in una certa proporzione. Tuttavia, se estendiamo l'esperienza a *tre* colori scelti a caso, per esempio il rosso, il verde e il blu indicati nella Fig. 5*b* e se facciamo variare le intensità a volontà, scopriremo che possono essere riprodotti la maggior parte dei colori osservati nella vita quotidiana, ivi compreso il bianco. Questo fatto, noto anche a Newton, è virtualmente la base della televisione a colori.

Scientificamente non è ancora possibile spiegare in dettaglio la ragione di questo fenomeno, si può soltanto dire che esso è il risultato dei processi fisiologici e psicologici fra la retina e i centri visivi del cervello. Si suppone che i « coni » della retina sono di tre specie: ciascuna sensibile rispettivamente al rosso, al verde e al blu; ma la sensibilità dei coni non si limita a bande di lunghezze d'onda molto strette, ma si estende in ciascun caso nelle bande adiacenti (colori) secondo alcune proporzioni decrescenti.

Per esempio se una luce gialla cade sulla retina, nessuno dei tre tipi di coni viene stimolato al valore massimo, ma i coni sensibili al rosso e al verde reagiscono e trasmettono il loro messaggio al cervello, il quale identifica come giallo l'insieme degli stimoli. Se gli stessi coni sono stimolati allo stesso grado dalle luci rossa e verde secondo certe intensità, si ottiene lo stesso risultato, cioè una sensazione di giallo.

Possiamo così concepire un gran numero (teoricamente infinito) di combinazioni luminose dei colori rosso e verde che, se raggiungono la retina nel conveniente rapporto delle loro intensità, danno luogo alla stessa impressione di colore del giallo. Inversamente, una variazione di intensità delle due sorgenti luminose, restando invariati i colori rosso e verde, darà luogo a tutta una gamma di stimoli dei coni « rossi » e « verdi » della retina, corrispondenti alla parte dello spet-

tro compreso fra il giallo e il verde, passando attraverso l'arancio, il giallo e il giallo-verde.

Si potrebbe concludere che se la sorgente luminosa verde viene sostituita con una sorgente blu e si fa variare l'intensità delle sorgenti blu e rossa, dovrebbe essere possibile riprodurre tutti i colori compresi nello spettro delle lunghezze d'onda fra il rosso e il blu, ossia la totalità dello spettro.

Purtroppo le cose non avvengono a questo modo. Con queste due sorgenti luminose noi riceveremo solo impressioni che variano dal violetto al porpora (i « porpora ») e, dato che la maggior parte di queste tinte non appaiono nello spettro naturale, esse non hanno lunghezze d'onda caratteristiche.

Solo quando aggiungiamo una terza sorgente luminosa, per esempio contemporaneamente una rossa, una verde e una blu è possibile, modificando i loro rapporti di intensità, produrre quasi tutti i colori che si incontrano in pratica, oltre ai porpora. Sicché tutti questi colori possono essere riprodotti con successo quanto più le sorgenti luminose utilizzate corrispondono ai colori spettrali; in questo senso si può enunciare un importante principio, basato unicamente sul fenomeno fisiologico della visione:

- tutte le sensazioni di colore desiderate possono essere prodotte con tre colori luminosi aventi opportuni rapporti di intensità; ossia si possono ottenere tutte le sensazioni di colore desiderate facendo variare i rapporti delle intensità luminose di tre dati colori.

Vedremo in seguito come questo semplice principio presenta imperfezioni, che conducono ad alcune limitazioni nella sua applicazione pratica. Tuttavia esso costituisce il principio fondamentale più importante nella scienza dei colori, o colorimetria.

Colori primari e componenti cromatiche.

Dopo avere stabilito il principio avanti enunciato, occorre subito dargli un significato quantitativo in vista della sua applicazione pratica. A tale fine sono state compiute un gran numero di esperienze con centinaia di persone, allo scopo non solamente di determinare i tre colori *primari* di luce la cui combinazione dia il massimo numero di colori spettrali più puri possibile, ma anche per fissare i rap-

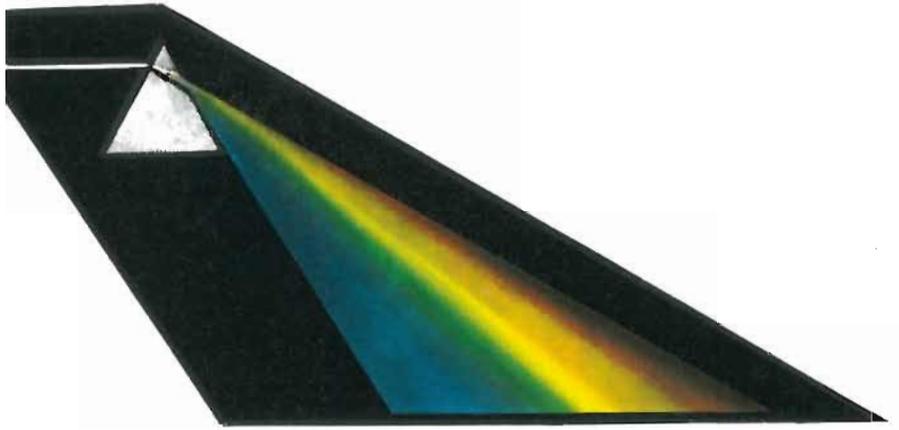


Figura 3. - Scomposizione della luce bianca solare in colori spettrali puri nell'attraversare un prisma.

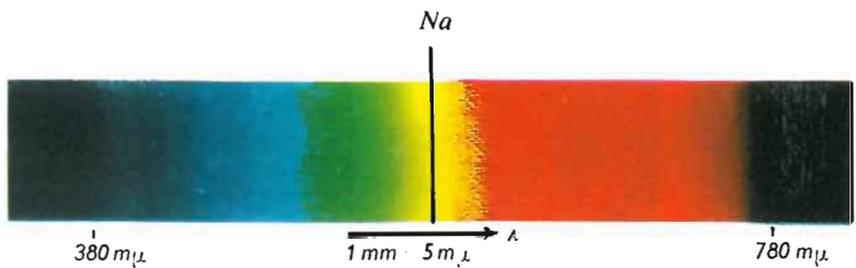
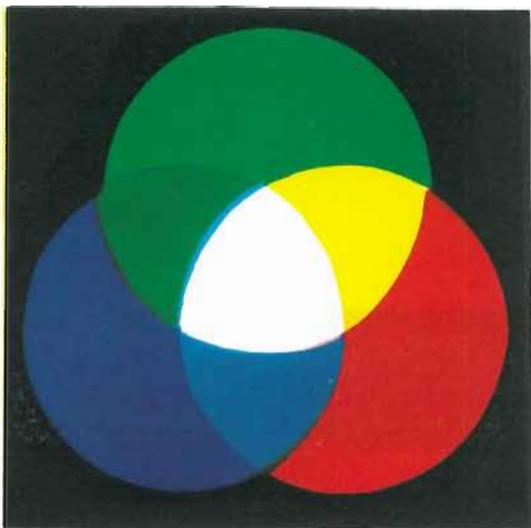


Figura 4. - Lunghezze d'onda della luce visibile.
 Na = luce emessa dalla lampada a vapore di sodio sulle lunghezze d'onda di 589 e 589,6 nm.



a



b

Figura 5.

- a) Miscuglio sottrattivo di materie colorate.
- b) Miscuglio additivo di luci colorate.

porti delle intensità delle tre sorgenti luminose necessarie per riprodurre tutti i vari colori spettrali. I risultati di queste esperienze sono stati riepilogati dalla Commissione Internazionale per l'Illuminazio-

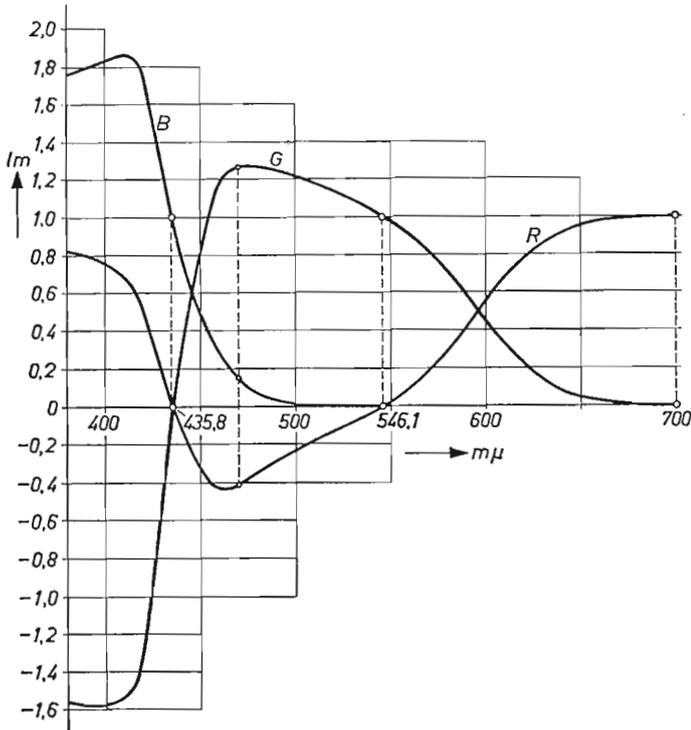


Figura 6. - Valori a tre stimoli dei colori spettrali. I colori primari sono il blu (435,8 nm) il verde (546,1 nm) e il rosso (700 nm).

ne (CIE) sotto forma di norme internazionali che sono graficamente riprodotte nella Fig. 6. Queste norme si riferiscono ai seguenti colori spettrali puri:

rosso:	lunghezza d'onda 700 nm
verde:	lunghezza d'onda 546,1 nm
blu:	lunghezza d'onda 435,8 nm

Le tre curve *R*, *V* e *B* della Fig. 6 mostrano l'intensità, espressa in lumen (lm) che ciascuna delle sorgenti primarie, rispettivamente rossa,

verde e blu, deve avere per riprodurre qualunque colore spettrale compreso tra 400 e 700 nm con l'intensità di 1 lm (il lumen è l'intensità di flusso luminoso, definito come la quantità di luce emessa in tutte le direzioni da una sorgente luminosa e che può essere, in una certa misura, confrontata con la potenza radiante; ritorneremo più avanti su questo argomento).

Possiamo così dire, in analogia con la terminologia meccanica, che tutti i colori spettrali possono essere ottenuti mediante tre componenti R , V e B e che i valori relativi di R , V e B in ogni punto della scala delle lunghezze d'onda rappresentano i valori delle componenti di colore ⁽¹⁾ di quel particolare colore spettrale.

Mostreremo in seguito che qualunque altro colore « mescolato » (colore impuro) può anche essere composto da componenti R , V e B appropriati, in opportune proporzioni.

Dalla Fig. 6 si vede che, per ottenere i colori spettrali aventi lunghezza d'onda inferiore a 546 nm, uno dei due colori di luce scelti deve essere necessariamente di natura negativa. Naturalmente, sul piano pratico ciò è impossibile, ma è importante ammettere tale concezione per seguire la nostra teoria. Circa tali valori negativi, possiamo constatare che in questa parte dello spettro non è possibile ottenere colori spettrali puri, ma solamente un miscuglio di un colore spettrale e della proporzione di quel colore spettrale che è negativo a quella lunghezza d'onda. Per esempio, non si può ottenere il colore spettrale blu-verde di 470 nm, ma è possibile realizzare un miscuglio di questo colore con una certa proporzione di rosso primario. Espresso in valori, un miscuglio di 1 lm di blu-verde (470 nm) e di circa 0,42 lm di rosso (700 nm) dà la stessa impressione di colore di circa 1,28 lm di verde (546,1 nm) mescolato con circa 0,14 lm di blu (435,8 nm).

È evidente che a quei punti della scala di lunghezze d'onda di Fig. 6 che corrispondono ai tre colori primari prescelti, l'intensità di quel particolare colore primario deve essere di 1 lm, mentre gli altri due primari non possono essere presenti. Questi punti si trovano a 435,8, 546,1 e 700 nm. Inoltre, in conformità con la natura additiva dei flussi luminosi mescolati, la somma dei tre valori delle curve deve essere costante per ogni punto della scala delle lunghezze d'onda, in accordo con il valore stabilito di 1 lm.

⁽¹⁾ L'espressione corretta è « coefficiente di colore tricromatico ».

Le curve R , V e B della Fig. 6 convengono solo per ricostituire colori spettrali, cioè i colori che corrispondono teoricamente ad una unica lunghezza d'onda; la riproduzione di tutti i colori che vediamo quotidianamente attorno a noi è alquanto più difficile, poiché essi non hanno quasi mai una sola lunghezza d'onda, ma in essi sono quasi sempre presenti parecchie lunghezze d'onda ripartite in maniera continua su una parte più o meno grande della scala spettrale (Fig. 2).

In tali casi, almeno teoricamente, la procedura consiste nel determinare mediante i valori delle curve R , V e B (Fig. 6) le tre componenti primarie corrispondenti a ciascuna delle lunghezze d'onda in causa, sommando ogni volta queste componenti pure rossa, verde e blu, per ottenere così il valore della componente totale rossa, verde e blu. I valori di queste componenti totali determinano così le intensità con le quali le tre sorgenti luminose primarie (435,8, 546,1 e 700 nm) debbono essere mescolate additivamente per dar luogo allo stimolo cromatico desiderato.

La curva di luminosità relativa.

Prima di cominciare a mettere in pratica ciò che abbiamo esposto, occorre determinare la distribuzione delle intensità delle diverse lunghezze d'onda di cui la luce è costituita. A questo scopo, come è necessario in tutte le tecniche di misura, si deve impiegare un'apparecchiatura che permetta di eseguire misure quantitative reali, facendo astrazione da considerazioni soggettive, le quali possono variare a seconda delle condizioni della prova. Nella misura della luce e dei colori, i metodi oggettivi hanno la massima importanza; in realtà, le valutazioni soggettive dei colori e delle luminosità eseguite da differenti osservatori differiscono invariabilmente, e in maniera considerevole nei casi estremi, a causa della visione parzialmente o anche totalmente difettosa dei colori. Dato che la sensazione soggettiva della luce ha la sua origine in una certa forma di energia, che è una energia radiante elettromagnetica, la soluzione evidente consiste nel basare tutti i calcoli teorici necessari in primo luogo sui metodi oggettivi di misura di questa energia.

Un fatto veramente notevole osservato in tutte le misure di energia radiante nella gamma spettrale (colorimetria) è la grande differenza fra i valori di energia misurati e le corrispondenti impressioni luminose percepite dall'occhio.

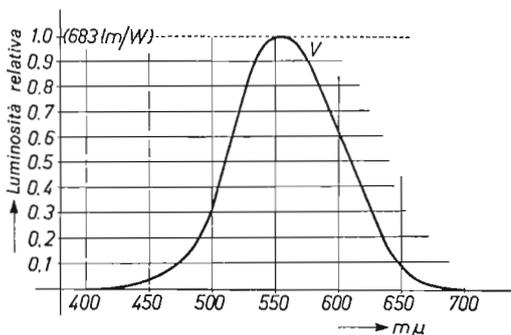


Figura 7. - Curva di luminosità relativa che mostra la sensazione di luminosità dai singoli colori spettrali emessi con eguale energia.

La Fig. 7 mostra il rapporto fra la potenza radiante (espressa in W) e l'impressione luminosa (in lumen) osservata per tutte le lunghezze d'onda. Questa curva, come quelle di Fig. 6, rappresenta la media dei risultati di un gran numero di osservazioni fatte con il concorso di numerose persone scelte come soggetti; essa è stata normalizzata e costituisce quella che si chiama *curva di luminosità relativa*. Essa indica la variazione di luminanza o *luminosità* dei diversi colori spettrali per l'osservatore « medio » per un'energia radiante costante emessa dalle singole sorgenti luminose spettrali.

Dalla figura si vede che la sensibilità dell'occhio umano è massima per la luce verde avente una lunghezza d'onda di circa 555 nm, e decresce verso le estremità rossa e blu dello spettro; le lunghezze d'onda superiori a circa 700 nm o più corte di circa 400 nm non sono percepite come luce, benché queste lunghezze d'onda possano essere emesse dalla sorgente con pari energia delle lunghezze d'onda visibili. Di queste radiazioni invisibili, le prime sono le radiazioni infrarosse (onde termiche) e le seconde le radiazioni ultraviolette. Si deve aggiungere che sulle lunghezze d'onda alle quali la conversione di energia radiante in luce visibile raggiunge il massimo, ossia a circa 555 nm, una potenza radiante di 1 W corrisponde a un flusso luminoso di circa 680 lm.

Dopo questa breve necessaria digressione, possiamo riprendere il nostro ragionamento sul problema della determinazione delle tre componenti di colori primari che permettono di riprodurre la luce di un colore non puro (miscuglio di colori), che copra una banda più o meno larga dello spettro delle lunghezze d'onda. Abbiamo già

fatto notare che a tale scopo si deve anzitutto determinare la concentrazione delle intensità di tutte le lunghezze d'onda presenti nel colore del miscuglio. Il migliore modo per tale determinazione consiste nell'eseguire misure di energia su tutta l'estensione dello spettro. Le singole lunghezze d'onda così definite possono allora essere scomposte nelle loro componenti mediante le curve R , V , B (Fig. 6) e queste, sommate, determineranno le componenti rossa, verde e blu totali.

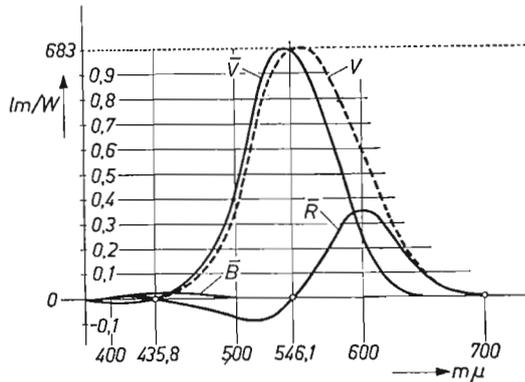


Figura 8. - Coordinate tricromatiche dei colori spettrali. I colori primari sono gli stessi di quelli della Fig. 6. La curva di luminosità relativa è indicata con la curva tratteggiata.

Però, siccome le diverse lunghezze d'onda emesse con potenza uniforme vengono percepite dall'occhio con rendimenti differenti, è evidente che non si possono semplicemente sommare le componenti così come sono; occorre anzitutto moltiplicarle per i rispettivi coefficienti indicati dalla curva di luminosità. Si ricorderà che le curve della Fig. 6 non sono basate su valori effettivi di potenza, ma sui confronti delle impressioni soggettive dei colori e delle luminosità. Il metodo più semplice consiste dunque nel moltiplicare i valori delle tre curve di Fig. 6 per quelli della curva di luminosità relativa e utilizzare queste nuove curve R , V , B , come le mostra la Fig. 8, per determinare le componenti di colori primari per ogni singola lunghezza d'onda. Fatto ciò, basta soltanto sommare le singole componenti per ottenere immediatamente, in lumen, le componenti totali rossa, verde e blu del colore desiderato. In breve, utilizzando \bar{R} lm di rosso (700 nm), \bar{V} lm di verde (546,1 nm) e \bar{B} lm di blu (435,8 nm) possono

essere prodotti correttamente gli stimoli del colore desiderato sia per quanto concerne la luminosità che per il colore.

Il diagramma di cromaticità.

Mentre le curve della Fig. 8 costituiscono aiuti teorici assai importanti nei calcoli colorimetrici e per la televisione a colori, esse non sono adatte a utilizzazione di ordine pratico; è possibile trovare un metodo di rappresentazione più conveniente. Senza entrare troppo in dettaglio, si può dire che semplici calcoli matematici permettono di trasformare le tre componenti \bar{R} , \bar{V} , \bar{B} — che si possono considerare anche come *coordinate spaziali* — in un altro sistema di coordinate spaziali. Una caratteristica di quest'ultimo, che è stato scelto per varie ragioni, è che la sensazione della luminosità è rappresentata da una sola coordinata (la coordinata Y), mentre la caratterizzazione intrinseca del colore, ossia la tinta e la saturazione, è espressa dalle coordinate X e Z . Per una indicazione inequivocabile dello stimolo del colore, basta semplicemente indicare i valori di queste due ultime coordinate. Si noterà allora che questi valori non sono misure dirette della tinta e della saturazione, ma che la relazione tra la tinta e la saturazione da una parte e X e Z dall'altra, è complessa. La trasformazione di cui sopra è stata effettuata per tutti i colori spettrali e i risultati sono stati tradotti sotto forma di tabelle di *stimoli tricromatici*.

Qualora il problema consista solo nello stabilire il valore della tinta e non della luminanza, un'altra conversione di curve fornisce una rappresentazione grafica molto pratica su un sistema di coordinate piane x e y .

Questo è il *diagramma di cromaticità* (triangolo dei colori) riprodotto sulla tavola fuori testo alla fine del volume e schematicamente riprodotto nella Fig. 9. La superficie curva contiene tutti i colori spettrali reali (sul perimetro) oltre ai colori di miscugli che esistono solo come sensazione visiva (all'interno della superficie chiusa e lungo la retta limite in basso).

Qualunque colore concepibile corrisponde ad un punto all'interno della figura individuato senza ambiguità dalle coordinate x e y . Dobbiamo fare notare che nessun metodo di stampa, di pittura o altro processo di riproduzione dei colori è in grado di riprodurre esattamente questo diagramma di cromaticità in tutte le sue tinte, non so-

lamente perché ciò oltrepassa le possibilità umane, ma anche perché gli inchiostri di stampa e le tinte non raggiungono la necessaria purezza di colore spettrale e non possono dunque corrispondervi.

Anche non conoscendo i ragionamenti matematici utilizzati nella costruzione del diagramma di cromaticità, è possibile trovare una analogia tra questo e la curva dell'arcobaleno, con la scala delle lunghezze d'onda molto compressa alle estremità del rosso e del blu.

Come abbiamo detto, i colori spettrali puri si trovano lungo il perimetro del diagramma; questi stessi colori risultano progressivamente più diluiti, cioè a dire sempre meno saturi, avvicinandosi al centro della figura. Al centro vi è il bianco. Le estremità in basso della curva a ferro di cavallo sono immaginariamente collegate con una retta, sulla quale si trovano le tinte porpora di cui abbiamo precedentemente parlato; esse sono miscugli di rosso e di blu che esistono solo come sensazioni visive, ma non esistono affatto nello spettro naturale.

Indipendentemente dalle indicazioni precedenti per la determinazione di qualunque punto di colore desiderato all'interno della curva mediante le coordinate x e y , possiamo anche attribuire a ciascun punto di colore una *lunghezza d'onda dominante*, ottenuta sul perimetro della curva tracciando una retta che dal punto « bianco » del triangolo passi per il punto di colore. Si può così anche attribuire una lunghezza d'onda dominante ai porpora tracciando una retta che dal punto bianco vada fino alla periferia della curva; però la lunghezza d'onda così trovata deve essere preceduta da un segno.⁽¹⁾

Per completezza dobbiamo forse aggiungere che, mentre il sistema di coordinate X, Y, Z utilizzato come base del diagramma di cromaticità è stato normalizzato dalla C.I.E. ed è anche utilizzato per la televisione a colori, altri sistemi di coordinate sono stati adottati per altri scopi.

Il vantaggio pratico del diagramma di cromaticità della C.I.E. è che la disposizione particolare dei valori x e y permette di determinare immediatamente i risultati di un miscuglio additivo di due o

⁽¹⁾ Infatti, il punto bianco, non è un vero punto, ma una piccola superficie all'interno del triangolo; in questa superficie, la C.I.E. ha designato due specie di bianco: il Bianco Standard B, che corrisponde alla luce solare a mezzogiorno, e il Bianco Standard C che corrisponde alla luce normale del giorno, un po' più bluastra. E quest'ultima che viene considerata come bianco normalizzato ai fini della televisione. Oltre a questi due Standard esiste un Bianco Standard A, adottato come norma per la luce di lampadine ad incandescenza con filamento di tungsteno.

più luci colorate qualsiasi mediante un diagramma geometrico semplice, come quello di Fig. 9, che riproduce schematicamente il diagramma di cromaticità.

R e V sono rispettivamente le sorgenti rossa e verde le cui lunghezze d'onda dominanti sono di circa 615 nm e 537 nm e le cui coor-

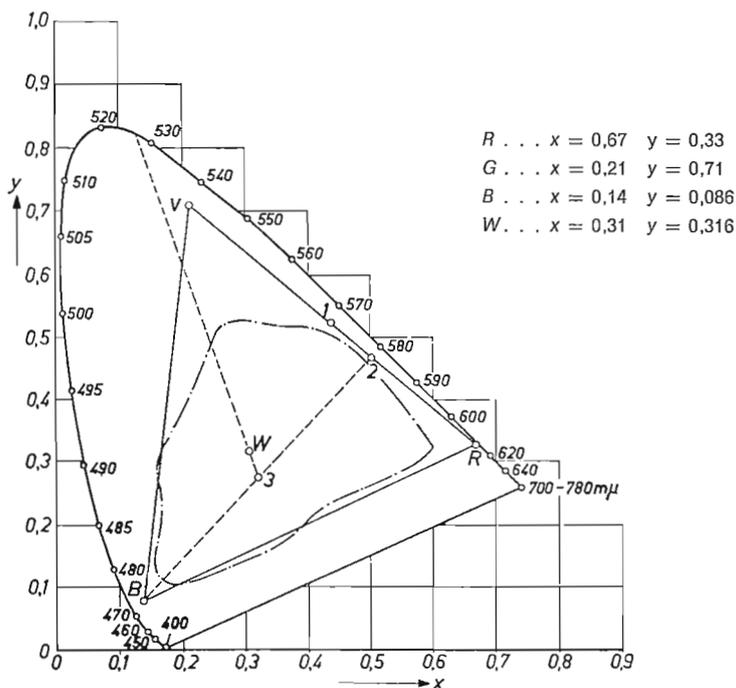


Figura 9. - Diagramma di cromaticità. R , V e B sono i colori primari adottati per la televisione a colori. W = punto bianco (Campione Illuminante C). Tutti i colori compresi nel triangolo R - V - B sono riprodotti nella televisione a colori. La curva tratteggiata mostra i colori riprodotti con gli altri metodi (pittura, stampa, cinematografia a colori, ecc.).

dinate x e y sono indicate nella figura. Se le due sorgenti emettono luci di eguale intensità, il punto di colore corrispondente al miscuglio dei due colori si trova esattamente al centro del segmento che collega R con V , ossia nel punto 1, la cui lunghezza d'onda dominante è di circa 572 nm (giallo). Se l'intensità di R viene raddoppiata rispetto a quella di V , il segmento R - V deve essere diviso nelle proporzioni di 2 : 1, ottenendo così il punto 2, con una lunghezza d'onda dominante di circa 580 nm (arancio).



Una moderna telecamera a colori.

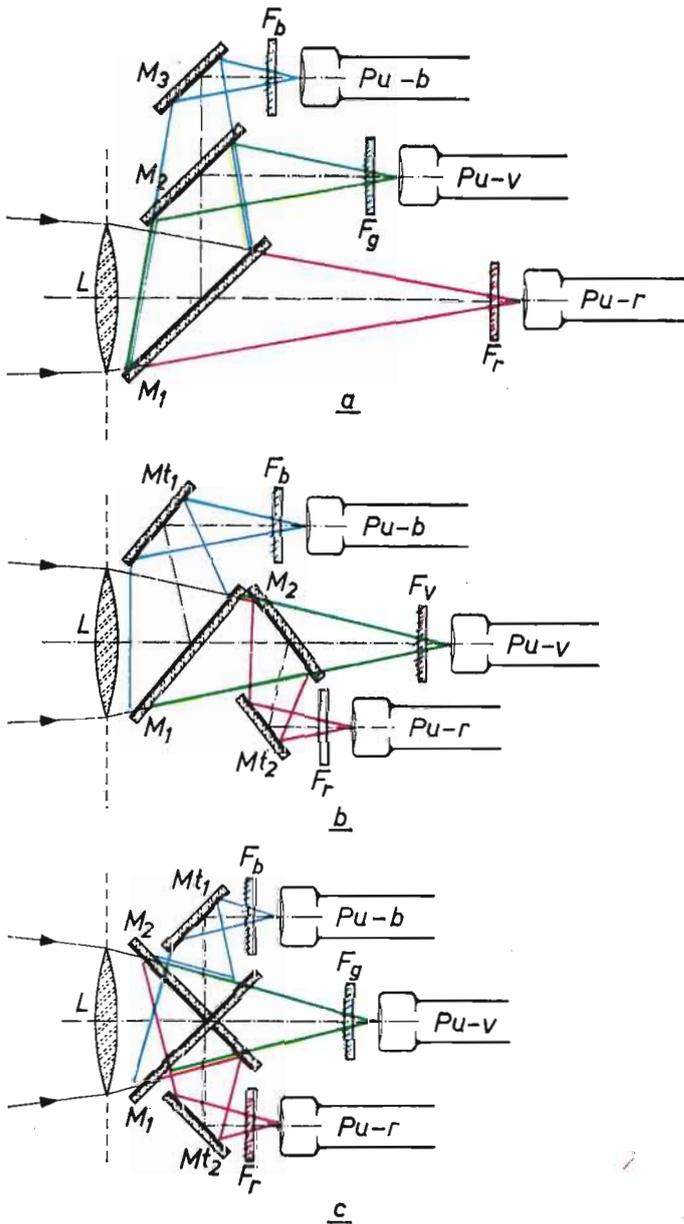


Figura 10. - Disposizioni diverse degli specchi dicroici
(Per i particolari vedasi il testo).

tori esterni, come per esempio la distanza alla quale l'oggetto o la sorgente vengono osservati, l'angolo col quale vengono visti e la luminosità dell'ambiente o del fondo. Non è naturalmente possibile applicare un qualsiasi metodo di misura ad una tale concezione puramente soggettiva.

Nello stesso tempo, ed anche non essendo possibile parlare di brillantezza o di luminosità, si deve notare che tutti i fenomeni luminosi possiedono una certa proprietà che li caratterizza, responsabile della stimolazione di una sensazione visiva e che dipende dalla potenza della sorgente (ed anche dalle condizioni esterne); questa proprietà è l'*intensità luminosa*. Prendiamo il caso della piccola sorgente luminosa costituita da una lampada elettrica tascabile. Con una pila non nuova il filamento produce sulla retina l'impressione di una luminosità molto più debole che con una pila nuova, poiché l'intensità luminosa del filamento è molto più elevata nel secondo caso. Se si pone un riflettore dietro la lampadina, l'intensità luminosa viene raddoppiata verso il davanti ed è nulla posteriormente; l'intensità luminosa della luce emessa da una sorgente può variare secondo la direzione. Inoltre l'intensità luminosa non ha niente a che vedere con le dimensioni della sorgente, più esattamente con la superficie che emette la luce; se per esempio gli oggetti vengono visti con una certa luminosità nel centro del fascio luminoso di una lampadina tascabile e se essi appaiono con la stessa luminosità sostituendo la lampadina tascabile con una candela posta nello stesso punto, l'intensità luminosa della fiamma sarà uguale a quella del minuscolo filamento della lampadina, che è virtualmente una « sorgente puntiforme ».

Di conseguenza, l'intensità di una sorgente luminosa può essere espressa in generale in funzione della direzione della luce e costituisce una misura dell'intensità con cui la superficie totale della sorgente emette luce in quella direzione.

L'unità internazionale di intensità luminosa è la *candela* (cd) equivalente a 1/60 dell'intensità luminosa emessa in direzione perpendicolare da 1 cm² di « corpo nero » alla temperatura di solidificazione del platino (1774 °C).

Poiché, come vedremo, l'intensità di una sorgente luminosa può variare secondo la direzione (un buon esempio è quello delle lampade fluorescenti tubolari, la cui intensità luminosa è praticamente nulla longitudinalmente, mentre è molto elevata in tutte le altre direzioni) è evidente che questa grandezza non fornisce alcuna indicazione sulla quantità totale di luce emessa da una sorgente in tutte le direzioni.

Per questo motivo noi utilizzeremo il termine *flusso luminoso*; il flusso luminoso emesso da una sorgente equivale all'energia luminosa emessa.

Riprendendo il nostro esempio precedente, che cioè una lampada tascabile illumina meglio gli oggetti circostanti quando la pila è nuova rispetto a quando è usata, si può dire che se si aumenta la potenza elettrica, aumenta ugualmente la potenza luminosa o meglio il flusso luminoso. D'altra parte, se l'intensità luminosa di una lampada viene aumentata in una direzione per effetto di uno specchio, nello stesso tempo viene ridotta l'intensità luminosa nell'altra direzione: ossia lo specchio non modifica affatto la potenza radiante totale emessa dalla lampada, cioè il flusso luminoso resta invariato. La sola differenza è che in un caso il flusso luminoso totale risulta uniformemente distribuito in tutte le direzioni mentre nell'altro caso esso viene concentrato in un angolo solido, orientato in una direzione piuttosto che in un'altra. L'unità di flusso luminoso è il *lumen* (lm); esso è il flusso luminoso emesso in un angolo solido unitario (uno steradiano) da una sorgente puntiforme avente una intensità luminosa di una candela ⁽¹⁾.

Per evitare ogni possibilità di errore, dobbiamo far notare che quando parliamo di flusso luminoso si considera la sola parte dell'energia radiante, emessa da una sorgente luminosa, che è percepita dall'occhio come *luce*; di conseguenza, quando si esprime il valore di un flusso luminoso, questo deve rapportarsi alla curva di luminosità (Fig. 7). Se tre sorgenti luminose rossa, verde e blu appaiono all'occhio con luminosità eguali e se si misurano queste sorgenti con una cellula fotoelettrica avente sensibilità uniforme su tutta l'estensione dello spettro, si rileva che l'intensità della luce rossa e ancor più quella della luce blu sono più alte rispetto a quella della luce verde. Perciò, quando diciamo che il flusso luminoso è identico alla potenza luminosa, ciò presuppone che l'occhio si comporti come un apparecchio misuratore di energia; di conseguenza, se vogliamo fare misure realmente obbiettive, le cellule fotoelettriche debbono essere munite di filtri colorati per far coincidere le loro caratteristiche con la curva di luminosità.

⁽¹⁾ Mentre nella geometria piana, l'unità angolare (1 radiante) viene ottenuta dividendo la circonferenza per $2\pi r$ (circonferenza = $2\pi r$), l'angolo solido unitario si ottiene dividendo la superficie di una sfera per $4\pi r^2$ (superficie della sfera = $4\pi r^2$).

Un'altra conseguenza di tutto ciò è che un coefficiente di conversione di potenza luminosa in potenza meccanica non può avere un valore fisso, ma dipenderà dalla lunghezza d'onda, secondo la curva di luminosità.

Come abbiamo già detto, il massimo di questa curva è su circa 555 nm (verde), lunghezza d'onda per la quale una potenza meccanica di 1 W corrisponde a circa 680 lm.

Indipendentemente dal flusso luminoso emesso da una sorgente e dalle intensità luminose nelle varie direzioni, le sorgenti luminose possiedono una terza caratteristica molto importante, la *luminanza*.

Questa grandezza indica la quantità di luce emessa per centimetro quadrato di superficie illuminata, misurata come intensità luminosa: l'unità è lo *stilb* (sb), definito come la luminanza di una superficie avente un'intensità luminosa di una candela per cm². Un'altra unità internazionale utilizzata come sottomultiplo è il cd/m² (ossia il *nit*), che è la luminanza di una superficie che emetta una candela per metro quadrato; si ha dunque $1 \text{ cd/m}^2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ sb}$. Nei paesi anglosassoni si utilizza più generalmente il *lambert-piede* (*foot-lambert*); $1 \text{ lambert-piede} = 3,43 \text{ cd/m}^2 = 3,43 \cdot 10^{-4} \text{ sb}$. Dunque le sorgenti luminose aventi una grande superficie hanno una luminanza più debole delle sorgenti puntiformi, la cui luminanza elevata è la causa dell'abbagliamento.

Le tre grandezze di cui abbiamo parlato avanti, la intensità luminosa, il flusso luminoso e la luminanza, caratterizzano le proprietà di una *sorgente luminosa* senza considerare il colore della luce; si deve notare che per « sorgenti luminose » si intendono tutti i corpi o superfici che emettono luce, comprendendo così ugualmente le sostanze luminescenti che rivestono lo schermo dei cinescopi dei televisori.

Per questi ultimi tubi, una sola delle grandezze precedenti è realmente importante dal punto di vista pratico, la luminanza, poiché essa è una indicazione diretta della sensazione visiva di brillantezza (ossia di luminosità) che darà lo schermo. In generale, la luminanza dei moderni cinescopi è dell'ordine di 300 cd/m² (70-80 *lambert-piede*).

A questo punto dobbiamo citare un altro termine utilizzato nella tecnica dell'illuminazione, l'*illuminamento*. Questo dipende dal flusso luminoso su una superficie; l'unità è il lux (lx) definito come la illuminazione prodotta in un metro quadrato da un flusso luminoso di 1 lm perpendicolare alla superficie. Questo concetto non è legato

alla sensazione visiva di brillantezza prodotta da una superficie illuminata: questa sensazione dipende anche dalle proprietà riflettenti della superficie considerata. Sotto questo aspetto, queste proprietà (la riflettanza) non debbono essere considerate a proposito di superfici più o meno speculari, ma piuttosto in funzione dell'attitudine della superficie a riflettere la luce di tutte le lunghezze d'onda (possibilmente diffusa in tutte le direzioni) e ad assorbire solo una piccola parte della luce. Un foglio di carta bianca, la cui riflettanza è di circa 70 - 80 %, sembrerà molto più brillante quando viene illuminato uniformemente rispetto, ad esempio, a un tessuto di lana scuro che riflette meno del 10 % della luce ed assorbe il resto.

L'illuminamento è la sola grandezza, utilizzata nella tecnica dell'illuminazione, che possa essere misurata direttamente con le cellule fotoelettriche; è questa la ragione per cui le misure di illuminamento quasi sempre servono di base non solamente per ricerche teoriche ma anche per i lavori pratici. I posimetri utilizzati dai fotografi misurano l'illuminamento, benché essi non siano graduati in lux ma in valori adatti al loro scopo, cioè in tempi di posa. Anche negli studi cinematografici i luxmetri o i posimetri sono di uso corrente; negli studi televisivi a colori, in particolare, essi sono indispensabili.

Con queste considerazioni termina la nostra trattazione della teoria dei colori e ora tratteremo le applicazioni alla televisione a colori.



CAPITOLO II.

APPARECCHIATURE DI RIPRESA TELEVISIVA A COLORI



Principio costruttivo.

Applicando il principio fondamentale esposto precedentemente, secondo cui lo stimolo di qualunque colore desiderato, ivi compreso il bianco, può essere prodotto da una conveniente combinazione di tre sorgenti di luce, la realizzazione teorica di un sistema di televisione a colori non presenta molte difficoltà.

La Fig. 11 costituisce uno schema di principio, molto semplificato, di un sistema televisivo a colori a circuito chiuso. In tale sistema la telecamera, con i necessari amplificatori, è collegata al ricevitore mediante un cavo la cui lunghezza non sia troppo grande; il segnale televisivo a colori non viene dunque trasmesso a radiofrequenza. La luce che penetra nella telecamera attraverso l'obbiettivo L è suddivisa, da un sistema di specchi a trasmissione parziale M_1 , M_2 e dallo specchio raddrizzatore M_3 , su tre tubi da ripresa $PU-r$, $PU-v$, $PU-b$, nei quali la scena da riprendere viene messa a fuoco con precisione sui fotocatodi. Mediante l'interposizione di filtri colorati F_r , F_v e F_b si effettua una selezione in rapporto con le curve \bar{R} , \bar{V} e \bar{B} della Fig. 8 per ciascun tubo, secondo le lunghezze d'onda presenti nella luce incidente, affinché i tre tubi ricevano la somma istantanea delle componenti \bar{R} , \bar{V} e \bar{B} . Come abbiamo visto precedentemente, queste somme di \bar{R} , \bar{V} e \bar{B} rappresentano le componenti totali rossa, verde e blu, R , V e B del colore considerato. In altri termini, con R lumen del colore rosso fondamentale, V lumen del colore verde fondamentale e B lumen

del colore blu fondamentale, il colore da riprodurre può essere ottenuto per mescolazione conformemente alla sua tinta e luminosità. È evidente che i colori delle sorgenti luminose utilizzate debbono realmente corrispondere a quelli sui quali è basata la Fig. 8, cioè a lunghezze d'onda di 700,0, 546,1 e 435,8 nm. Si noterà però che nella televisione a colori si utilizzano colori fondamentali differenti, quelli indicati con R , V e B sulla Fig. 9. Le correzioni saranno trattate in seguito.

Come abbiamo visto, uno dei tubi della telecamera riceve tutte le componenti rosse, un altro le componenti verdi e l'ultimo le componenti blu della luce incidente.

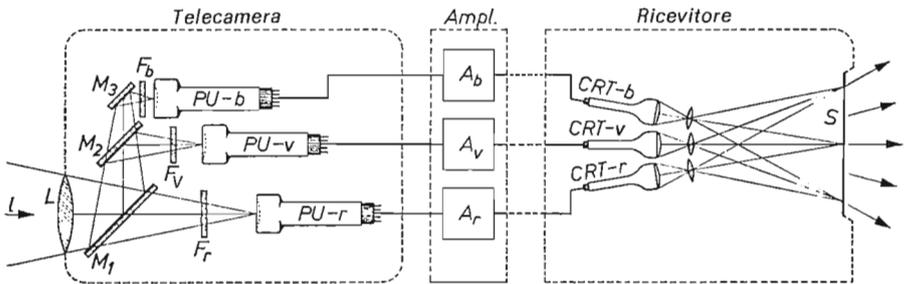


Figura 11. - Schema a blocchi di un sistema televisivo a colori a circuito chiuso.

A_b, A_v, A_r = amplificatori video rispettivamente per i canali blu, verde e rosso. $CRT-b, CRT-v, CRT-r$ = cinescopi a colori con le sostanze luminescenti blu, verde e rossa. F_b, F_v e F_r = filtri blu, verde e rosso. L = obiettivo. M_1, M_2 = specchi dicroici. M_3 = specchio normale. $PU-b, PU-v, PU-r$ = tubi da ripresa blu, verde e rosso. S = schermo traslucido. I = luce proveniente dalla scena ripresa.

I segnali video forniti dai tubi, risultanti dall'analisi abituale a sequenza di riga, e che chiameremo d'ora in poi R , V e B , verranno poi amplificati per essere trasmessi verso il ricevitore. Nel ricevitore questi segnali comandano i pannelli elettronici di tre piccoli cinescopi, le cui sostanze luminescenti sono scelte in modo che le loro fluorescenze corrispondono ai tre colori fondamentali. Le tre immagini ottenute possono essere proiettate, mediante opportuni sistemi ottici, su uno schermo traslucido; si produce allora un miscuglio additivo e la scena ripresa risulta riprodotta nei suoi colori naturali. Si può aggiungere che adottando un sistema così semplificato, questo potrà dare soltanto risultati otticamente mediocri, ma ritorneremo su questo punto.

La telecamera.

Mentre in linea di principio le telecamere a bianco e nero contengono solo tre elementi funzionali:

- a) un sistema ottico,
- b) un tubo da ripresa,
- c) un preamplificatore,

una telecamera a colori deve averne quattro:

- a) un sistema ottico,
- b) un dispositivo di separazione di colori,
- c) tre tubi similari da ripresa,
- d) tre preamplificatori similari.

Le funzioni del sistema ottico, dei tubi da ripresa e dei preamplificatori sono, in linea di principio, uguali come per le telecamere a bianco e nero, ma l'elemento addizionale di separazione dei colori richiede qualche spiegazione.

Il discriminatore dei colori.

Come abbiamo detto, i colori fondamentali utilizzati in televisione non sono gli stessi di quelli che sono stati normalizzati dalla C.I.E. per ricerche teoriche.

I colori indicati in precedenza, le cui lunghezze d'onda dominanti sono approssimativamente 615 nm (rosso), 532 nm (verde) e 470 nm (blu) sono stati adottati per la televisione principalmente allo scopo di ottenere il rendimento massimo delle sostanze luminescenti utilizzate. Per farle corrispondere a queste lunghezze d'onda, le curve della Fig. 8 sono state adeguatamente adattate; il metodo matematico è analogo a quello che permette di trasformare un sistema di coordinate in un altro nel diagramma di cromaticità, ciò che fornisce le curve della Fig. 12; anche in questo caso, come nella Fig. 8, si ottengono valori negativi delle tre componenti fondamentali in tutto lo spettro visibile. Siccome una luce negativa non può evidentemente esistere, ciò significa che praticamente non vi è alcun colore spettrale che possa essere riprodotto esattamente, fatta eccezione del rosso fondamentale (615

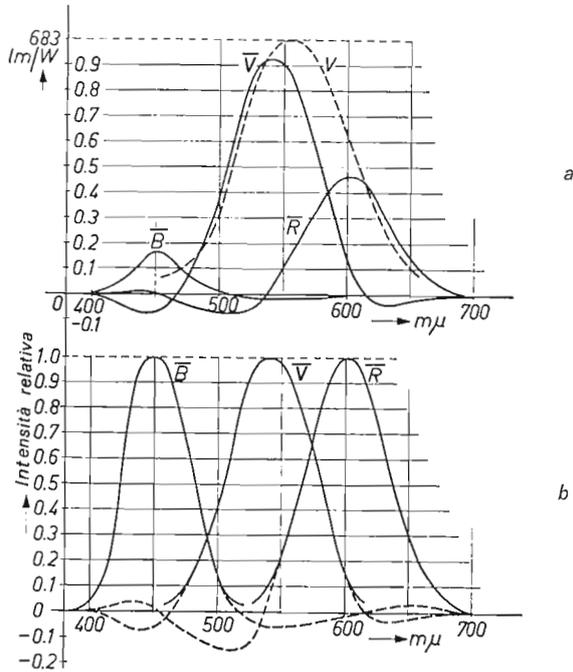


Figura 12. - Coordinate cromatiche delle lunghezze d'onda spettrali dei colori primari che formano la base della televisione a colori.

a) Valori relativi; la linea tratteggiata V rappresenta la curva di luminosità relativa.

b) Curve normalizzate riferite all'unità.

nm) utilizzato come colore spettrale; questo era prevedibile data la posizione dei punti corrispondenti ai colori fondamentali sul diagramma di cromaticità di Fig. 9.

Il fatto che la somma delle tre componenti, \bar{R}' , \bar{V}' e \bar{B}' è nuovamente uguale al valore corrispondente sulla curva normalizzata della luminosità a tutte le lunghezze d'onda prova solamente la precisione dei calcoli. Se i valori fossero indicati, in ordinata, in numeri invece che in lm/W (non tenendo conto del rendimento di conversione dell'energia radiante in energia luminosa) la somma delle tre componenti sarebbe costante per tutte le lunghezze d'onda (vedasi Fig. 6).

In linea generale, le curve come quelle della Fig. 12a vengono tracciate alla stessa maniera utilizzata per la Fig. 12b, dove i valori mas-

simi rappresentano l'unità. Questo metodo non conviene molto per considerazioni teoriche, ma è molto utile in pratica, soprattutto per stabilire le caratteristiche degli specchi e dei filtri del discriminatore dei colori, oltre che per i circuiti di amplificazione, di controllo e di funzionamento.

Per la stessa ragione, questa normalizzazione dei valori massimi non è solamente utilizzata sulla carta, ma anche per lavori pratici; in altri termini, amplificando i segnali di differenti intensità dei tubi di ripresa conformemente a questo principio, i loro valori massimi saranno resi uguali. Ciò viene ottenuto in parte nella telecamera, mediante una conveniente regolazione dei punti di funzionamento dei tubi da ripresa o dei preamplificatori, ma l'equalizzazione finale è effettuata solo quando i segnali raggiungono uno dei primi stadi degli amplificatori correttori.

Partendo dall'uscita di questi importanti amplificatori fino a giungere all'entrata dei ricevitori, tramite i circuiti principali di trasmissione, si deve allora tener presente che i tre segnali di colore *R*, *V* e *B* hanno tutti lo stesso valore massimo. In linea di principio, naturalmente sarebbe possibile regolare le tensioni dei segnali su questi valori per qualunque dato colore non molto saturo ma, per evidenti ragioni, si preferisce fare una tale regolazione con un oggetto bianco posto dinanzi alla telecamera (monoscopio a bianco e nero). In questo caso, in base alle curve della Fig. 12, si ha che i tre segnali raggiungeranno i valori massimi assoluti, in conseguenza della distribuzione uniforme di energia spettrale nella luce bianca; questi valori massimi possibili debbono essere determinati in maniera molto precisa se si vuole ottenere il rendimento massimo di tutta la rete di trasmissione.

È evidente che i rapporti di intensità dei tre segnali di colore modificati come diremo, debbono essere ripristinati prima che tali segnali vengano applicati ai tre cinescopi all'estremità della linea di trasmissione, ciascuno dei quali presenta la fluorescenza in un colore particolare.

Come si può calcolare sulla base dei valori tricromatici, 1 lm di bianco può essere ottenuto con 0,30 lm di rosso fondamentale, 0,59 lm di verde fondamentale e 0,11 lm di blu fondamentale ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Lo stesso risultato potrebbe essere ottenuto confrontando i valori sulle curve *R'*, *V'* e *B'* della Fig. 12 corrispondenti ai colori primari. Per « colori primari » intendiamo, anche nei capitoli che seguono, i colori adottati per la televisione a colori.

I tre segnali di colore ricevuti al loro valore massimo, cioè nel rapporto 1 : 1 : 1, debbono dunque essere ridotti nel ricevitore al rapporto 0,30 : 0,59 : 0,11 senza dimenticare che questa riduzione deve tener conto non solamente delle differenze di rendimento delle sostanze luminescenti utilizzate, ma anche delle differenze di linearità delle caratteristiche dei tre sistemi di cannoni elettronici. Le tensioni di controllo necessarie alla riproduzione del bianco, con le sostanze luminescenti utilizzate attualmente, sono circa nel rapporto 0,40 R : 0,34 V : 0,26 B . Come si vedrà nei paragrafi che seguono, il rapporto teorico 30 : 59 : 11 è importante sotto molti aspetti.

Secondo le curve della Fig. 12b (con tratto continuo) vediamo che in pratica non sono state considerate né le parti negative delle tre curve, né le bande di « trasmissione secondaria » nel rosso e nel blu; inoltre, in vicinanza dell'asse zero le curve sono relativamente imprecise. In pratica, gli scarti dei valori teorici in questa zona di debole intensità non sono apprezzabili nel colore. È della massima importanza considerare le curve teoriche nella regione dove le curve si sovrappongono, cioè fra 480 e 500 nm e anche fra 550 e 600 nm, zone dove vengono riprodotte le tinte della pelle e altre tinte del viso. In rapporto con le zone « di trasmissione » di cui abbiamo parlato, ci si ricorderà egualmente che, come abbiamo detto a proposito della Fig. 11, le lunghezze d'onda delle componenti della luce incidente debbono essere suddivise, mediante filtri, fra i tre tubi della telecamera, in conformità delle curve \bar{R} , \bar{V} e \bar{B} . Queste curve possono dunque essere considerate come le curve di trasmissione per i tre filtri colorati. In pratica questa asserzione deve essere corretta in quanto le caratteristiche di trasmissione dei tre canali dipendono non solo da quelle dei filtri ma anche dalle caratteristiche spettrali dei tubi della telecamera e degli specchi a trasmissione parziale. Ciò significa che le curve ottenute moltiplicano i valori relativi delle caratteristiche dei rispettivi filtri, tubi e specchi per ogni singolo canale debbono corrispondere alle curve \bar{R} , \bar{V} e \bar{B} della Fig. 12b. Ad esempio, la Fig. 13 fornisce le caratteristiche spettrali del tubo image-orthicon, del Vidicon e del Plumbicon, i tre tipi di tubi da ripresa utilizzati attualmente per la televisione a colori.

Specchi dicroici.

Porteremo ora la nostra attenzione alle caratteristiche spettrali degli specchi a trasmissione parziale. Non si tratta di una applicazione

Pagina mancante

Pagina mancante

Il funzionamento degli specchi diecrici si basa sul fenomeno delle interferenze dovute alle onde luminose che attraversano mezzi ottici molto sottili.

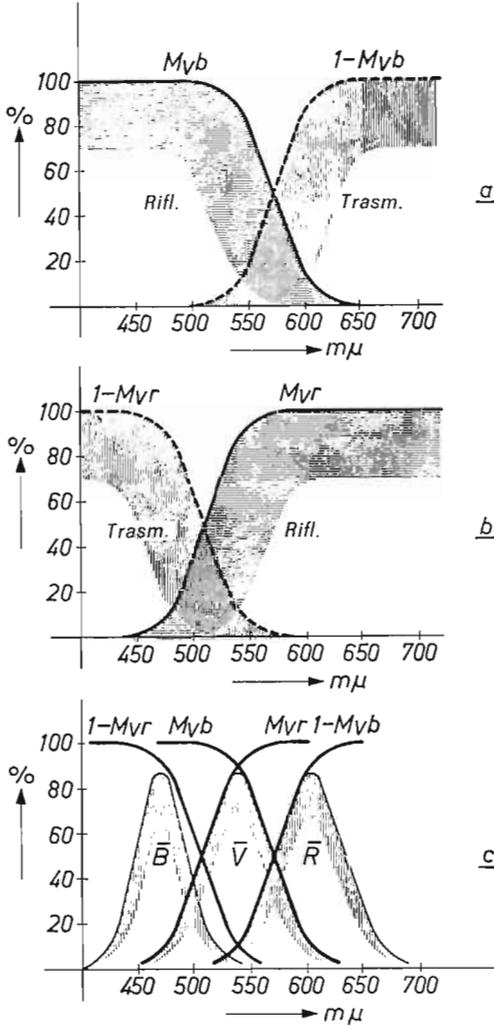


Figura 14. - Caratteristiche spettrali degli specchi diecrici:

- a) Specchio che riflette il verde ed il blu, sicché la curva di riflettanza è M_{vb} ; la curva di trasmettenza è approssimativamente $1 - M_{vb}$.
- b) Specchio che riflette il verde e il rosso, sicché la curva di riflettanza è M_{vr} ; la curva di trasmettenza è approssimativamente $1 - M_{vr}$.
- c) Effetto di due specchi posti uno dietro l'altro con un angolo di 45° ; i tratteggi indicano le curve di trasmissione desiderate R , V e B per i canali rosso, verde e blu.

Un fenomeno naturale dello stesso genere è conosciuto da molti secoli, e questo spiega la diversità dei colori nelle bolle di sapone o nell'olio che galleggia sull'acqua o, per prendere un esempio più moderno, gli anelli di Newton prodotti fra una diapositiva a colori e la sua lastra di vetro di protezione.

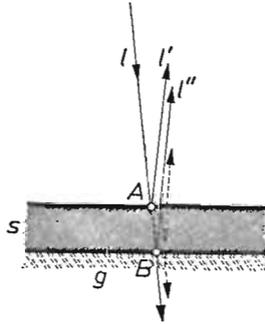


Figura 15. - Riflessione della luce da parte di uno strato interferenziale sottile.

l = raggio luminoso incidente; l' , l'' = raggi riflessi; g = specchio di vetro; s = strato interferenziale il cui spessore è circa un quarto della lunghezza d'onda della luce; A = entrata del raggio incidente; B = punto di uscita dallo strato.

La Fig. 15 mostra schematicamente, ingrandito circa di 10.000 volte, il meccanismo di queste frange di interferenza. Quando un raggio luminoso cade quasi perpendicolarmente sulla superficie (punto A) di uno strato molto sottile di un mezzo avente proprietà ottiche e possibilmente una rifrazione elevata, una parte della luce viene riflessa (raggio l'). La luce incidente residua attraversa il mezzo (punto B) e se essa cade in seguito su un vetro avente indice di rifrazione minore di quello del mezzo, si produce nuovamente una riflessione: un raggio l'' viene riflesso verso l'entrata. Se supponiamo che la lunghezza d'onda del raggio sia di 700 nm e che lo spessore dello strato sia $\frac{1}{4}$ di questo valore, cioè 175 nm (più esattamente, lo spessore dello strato dovrebbe essere $175/n$, essendo n l'indice di rifrazione del mezzo ottico), la differenza di lunghezze d'onda fra i raggi l' e l'' sarà esattamente uguale a metà della lunghezza d'onda, ciò che corrisponde ad uno sfasamento di 180° . Allo stesso modo, se avviene una riflessione a partire dal mezzo otticamente più debole (indice di rifrazione minore) si ha ancora uno sfasamento di 180° sicché, in presenza di tali condizioni, il raggio l'' (riflessione in B) esce con uno sfasamento totale

di 360° , ossia *in fase* con il raggio l' . Ne risulta che la riflettanza della superficie è più elevata per la luce di 700 nm.

Si può facilmente calcolare che per una luce spettrale avente ad esempio metà di questa lunghezza d'onda (350 nm), la quale è una luce violetta appena visibile, la differenza di lunghezza d'onda fra l' e l'' sarebbe uguale alla lunghezza d'onda totale e che, in seguito alla riflessione concomitante in B (la quale è in opposizione di fase) il raggio l'' esce da A in *opposizione di fase* con l' . Così, per la lunghezza d'onda di 350 nm, la riflettanza della superficie è minore. Un semplice calcolo mostra che, seguendo una certa legge, la riflettanza diminuisce da un massimo a 700 nm fino ad un minimo a 350 nm. Un tale specchio è quello che noi chiamiamo uno specchio a riflessione rossa, però nella sua forma più semplice lo specchio presenterà un effetto esattamente opposto se, dopo aver attraversato il mezzo sottile, il raggio l cadesse nel punto B su un vetro avente un indice di rifrazione più alto; la rifrazione parziale su questo punto non subirebbe lo sfasamento di 180° . I raggi uscenti l' e l'' in A sarebbero in opposizione di fase per 700 nm, ma in fase per 350 nm e si avrebbe uno specchio dicroico a riflessione blu.

Andremmo oltre lo scopo di questo libro se aggiungessimo alle spiegazioni schematiche precedenti altri dettagli teorici e pratici, che però sono molto importanti, come l'effetto di più di una riflessione sulle due interfacce (linee tratteggiate nella Fig. 15) o di una luce incidente obliqua.

Quest'ultimo caso si presenta nella telecamera a colori, ma basterà dire che il principio dello specchio non ne risente, poiché la caratteristica spettrale è semplicemente spostata verso le onde più corte dello spettro. Però, se l'angolo è molto grande, si produce una polarizzazione, ciò che provoca una perdita di luce. Si deve tener conto di tali due effetti quando gli specchi sono montati vicino a obbiettivi di grande apertura (Fig. 16), dato che si possono manifestare differenze notevoli nei colori fra i due lati dell'immagine; queste differenze possono essere parzialmente compensate diminuendo gradualmente lo spessore dello strato.

All'epoca in cui si eseguivano i primi esperimenti di televisione a colori, i soli specchi disponibili erano del tipo allora utilizzato per altre apparecchiature ottiche, come ad esempio i telemetri fotografici. La migliore sostanza per lo strato interferenziale molto sottile necessario era un foglio d'oro, ma esso dava luogo ad una considerevole perdita di luce. Poi l'evoluzione e i più recenti perfezionamenti delle

tecniche di vaporizzazione sotto vuoto, che sono avvenuti durante gli ultimi 20 anni, hanno permesso non solo di realizzare rivestimenti di materiali ottici di alta qualità praticamente senza perdite ma, ciò che è ancora più importante, di poter sovrapporre vari strati gli uni sugli altri. Ora, se tali rivestimenti hanno alternativamente indici di rifrazione bassi e alti, si possono ottenere a volontà quasi tutte le caratte-

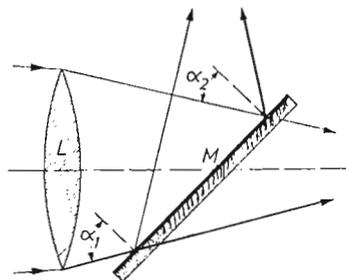


Figura 16. - Gli angoli di incidenza α_1 e α_2 sui lati sinistro e destro degli specchi dicroici M non sono uguali, di modo che le proprietà selettive non sono le stesse. L = lente.

ristiche spettrali desiderate. In linea generale la caratteristica risulta tanto più ripida quanto maggiore è il numero degli strati. Per una curva come quella di Fig. 14 si ha normalmente bisogno di sette strati; in questo caso le riflettanze massime sono superiori al 90 % e le perdite per assorbimento risultano trascurabili.

Fra le sostanze utilizzate per la formazione degli strati vi è il solfuro di zinco e la criolite. Può essere interessante aggiungere che l'applicazione di strati interferenziali costituisce oggi un procedimento normale nella fabbricazione di obiettivi di alta qualità (obiettivi trattati), non per conferire ad essi dicroismo ma per ridurre al minimo le riflessioni.

Realizzazione pratica del discriminatore dei colori.

Il discriminatore dei colori rappresentato nella Fig. 11, è rappresentato con maggiore dettaglio nella Fig. 10a. Si noterà frattanto che questa disposizione puramente teorica presenta in pratica l'inconveniente di richiedere una distanza molto grande fra l'obiettivo e i tubi da ripresa. Affinché si formi un'immagine nitida su ciascun tubo, questi debbono essere tutti alla stessa distanza dall'obiettivo, e ciò di-

pende dal tubo più lontano, nel nostro caso da quello del blu. La disposizione della Fig. 10*b* è più efficace; in essa lo specchio diecrico M_1 riflette solo la parte blu dello spettro, che passa in seguito al tubo da ripresa corrispondente tramite uno specchio riflettente Mt_1 e un filtro correttore F_b . Le bande spettrali rossa e verde della luce incidente da M_1 giungeranno allo specchio diecrico M_2 , che riflette il rosso e trasmette tutto il verde. Così quando, dopo aver attraversato il filtro correttore del verde F_v la luce verde cade direttamente sul tubo da ripresa $PU-v$, il rosso viene riflesso da Mt_2 prima di raggiungere il tubo da ripresa $PU-r$ passando attraverso F_r . Se si confronta con la Fig. 10*a*, si vede che la distanza dall'obbiettivo ai tubi di ripresa è diventata molto più breve.

Questa distanza può essere ulteriormente ridotta incrociando gli specchi come indicato nella Fig. 10*c*.

Il lettore vedrà che, malgrado gli specchi incrociati, il risultato è identico a quello della Fig. 10*b*.

Però un tale sistema richiede la più grande precisione possibile nella posizione degli specchi, dovuta al fatto che il più piccolo errore angolare, o anche uno spostamento parallelo degli specchi, comporterebbe la formazione di immagini doppie. Questo metodo non è dunque utilizzato negli analizzatori a punto mobile per diapositive e per il cinema, per i quali non si tratta di avere una riproduzione minuziosa delle scene reali sui tubi da ripresa, ma piuttosto concentrare

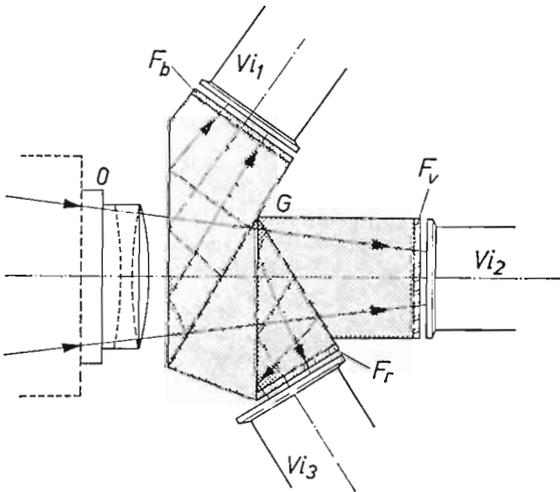


Figura 17. - Scomposizione dei colori mediante prismi di vetro. O = lente; G = blocco di prismi; F_b , F_v , F_r = filtri blu, verde e rosso; V_{i1} , V_{i2} , V_{i3} = vidicon.

la luce che passa attraverso un elemento di una diapositiva o di un film su un fotomoltiplicatore. Nelle telecamere per ripresa diretta viene adottato universalmente il sistema di Fig. 10b.

In seguito ai progressi più recenti, i singoli specchi sono stati sostituiti con prismi di vetro uniti insieme (Fig. 17); gli strati diecrici sono applicati sulle interfacce, non solo per proteggere gli strati interferenziali sensibili all'atmosfera e alla polvere, ma più particolarmente allo scopo di ridurre ancora la distanza fra l'obiettivo e il tubo. Vedremo ora come si raggiunge questo risultato.

Obbiettivi delle telecamere, lenti ausiliarie.

La necessità di ridurre più che possibile la distanza fra l'obiettivo e i tubi da ripresa, di cui abbiamo parlato varie volte, deriva da quanto segue: ogni obiettivo ha una distanza caratteristica sulla quale gli oggetti « all'infinito » vengono ricevuti in maniera nitida, e ciò vale ugualmente, con una precisione sufficiente, anche per gli oggetti che sono lontani solo qualche metro; questa è la *distanza focale* dell'obiettivo. Essa non viene misurata a partire dalla faccia anteriore o posteriore dall'obiettivo, ma da un piano teorico, detto *piano principale*, che coincide con l'asse di simmetria solo nel caso di una semplice lente biconvessa (Fig. 18a).

Nei sistemi ottici moderni, che sono stati condotti a un elevato grado di perfezione, il luogo del piano principale (o in certi casi di due di essi) può essere posto in qualunque punto compreso fra limiti molto ampi, a seconda dello scopo perseguito dal sistema, sia avanti sia

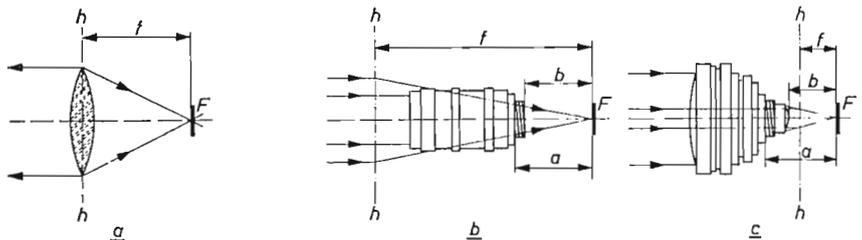


Figura 18. - Distanze focali nel piano principale degli obiettivi o lenti:

a) Lente biconvessa.

b) Teleobiettivo (grande distanza focale).

c) Obiettivo grandangolare (corta distanza focale).

a = dimensione del montaggio (fissaggio meccanico); b = dimensione utile; f = distanza focale; $h-h$ = piano principale; F = piano di immagine (film).

posteriormente all'obiettivo (per esempio teleobiettivi, obiettivi grandangolari, vedi le Figg. 18*b* e *c*). Questa posizione variabile del piano principale è in rapporto con la « dimensione della montatura » (meccanica) che è stata normalizzata per permettere l'intercambiabilità degli obiettivi fotografici e cinematografici. Questa dimensione è la distanza dal film (piano di immagine) alla spallatura della montatura dell'obiettivo (distanza a nella Fig. 18*b*). Indipendentemente da ciò, ogni sistema ottico ha una dimensione, particolarmente importante in televisione, detta distanza utile (tiraggio ottico); essa è la distanza dal film al piano limite dell'obiettivo che ne è più vicino. Di conseguenza, questa distanza è sempre inferiore alla dimensione della montatura (dimensione b nelle Figg. 18*b* e *c*).

Anche malgrado tutta la matematica, non è possibile situare il piano principale in qualunque punto scelto a caso che potrebbe convenire oltre l'obiettivo; la scelta è sempre limitata dalla relazione che esiste fra questo piano e la distanza focale dell'obiettivo.

Indipendentemente da questa ragione, vi è anche una certa relazione fra la distanza focale e la distanza utile; sarebbe difficilmente possibile sul piano pratico realizzare un buon obiettivo a grande apertura, che abbia una distanza utile circa doppia della distanza focale, ciò che è invece richiesto per una telecamera a colori, per il fatto che il discriminatore dei colori deve essere posto nello spazio che separa l'obiettivo dal piano di immagine. Nelle telecamere con image-orthicon, ciò comporterebbe da 35 a 40 cm. Infatti esistono obiettivi aven-

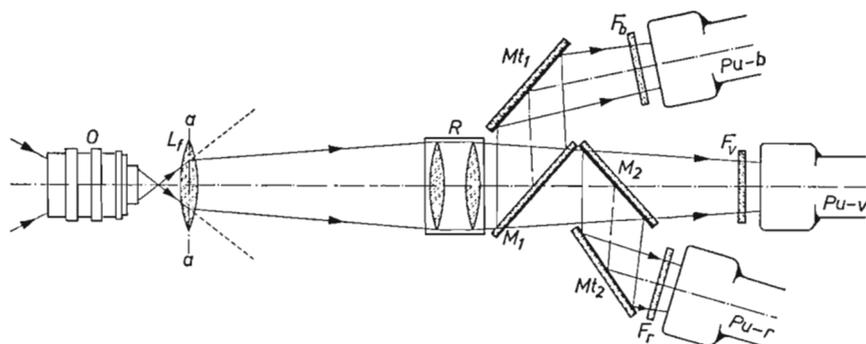


Figura 19. - Sistema di scomposizione dei colori mediante lente ausiliaria.

O = obiettivo; F_b, F_v, F_r = filtri blu, verde e rosso, L_f = lente di campo; M_1, M_2 = specchi dicroici blu e rosso; $M_{1,1}, M_{1,2}, M_{2,1}, M_{2,2}$ = specchi piani; $Pu-b, Pu-v, Pu-r$ = tubi image-orthicon per i canali blu, verde e rosso; R = lente ausiliaria; $a - a$ = piano di immagine dell'obiettivo.

ti così grandi distanze utili, ma essi hanno una apertura relativamente debole e, a causa della loro grande distanza focale, che dà luogo ad una prospettiva « telescopica », essi sono senza applicazioni pratiche per il lavoro in studio.

Solo recentemente, è stato possibile conciliare queste condizioni apparentemente incompatibili di una grande distanza utile e di una corta distanza focale, aggiungendo una lente ausiliaria o lenti « relé ». La Fig. 19 mostra schematicamente un sistema di questo genere, utilizzato oggi nelle telecamere da ripresa da studio negli Stati Uniti e in Giappone.

Un obiettivo a grande apertura di alta qualità (O), selezionato fra i numerosi modelli di obiettivi per macchine da ripresa a 35 mm, produce un'immagine dettagliata della scena sul suo piano focale normale ($a-a$). Se non vi fosse una lente L_f su questo piano, l'immagine esisterebbe solo nell'aria e, oltre, i raggi luminosi dell'obiettivo O , convergenti verso il piano focale, diventerebbero divergenti. Un secondo sistema ottico R , anch'esso di alta qualità (rappresentato da due elementi nella figura) posto dietro l'immagine ad una distanza uguale a due volte la sua distanza focale, riproduce questa immagine esattamente con la stessa dimensione in un punto più distante, pure a due volte la distanza focale, dove essa cade sul fotocatodo del tubo image-orthicon.

Questo sistema addizionale R , il cui solo scopo è di spostare di una certa distanza l'immagine originale, costituisce il *sistema ottico ausiliario* (o relé).

In generale non è difficile trovare un sistema tale che il doppio della sua distanza totale sarebbe sufficiente a contenere il discriminatore dei colori (30 a 35 cm) ma le cose vanno diversamente se si vuole un rapporto di immagine 1 : 1. A tal fine, il sistema ausiliario viene realizzato con due sistemi analoghi di alta qualità situati l'uno di fianco all'altro.

La lente semplice L_f nel piano immagine dell'obiettivo principale serve a concentrare i raggi divergenti della luce nel grande angolo dietro l'immagine nell'aria (linea indicata a tratto e punto nella Fig. 19) e a trasmetterli totalmente alla lente ausiliaria. Senza questa lente « di campo » la rapidità della lente ausiliaria dovrebbe essere almeno due volte più alta di quella dell'obiettivo principale, ciò che sarebbe impossibile.

Possono essere usati altri tipi di sistemi ausiliari con uguali risultati, per esempio quelli con i loro elementi separati in due parti tra i

quali è intercalato il sistema di specchi, ma in questo caso la sezione posteriore deve essere suddivisa in tre parti, dato che gli specchi forniscono tre fasci luminosi.

Indipendentemente dall'ingombro del sistema ausiliario, questo presenta anche inconvenienti dovuti al fatto che in un sistema eccellente, perfettamente corretto, la luce che penetra nell'obbiettivo principale deve attraversare 30, o anche più, transizioni tra vetro e aria prima di arrivare sul fotocatodo, e malgrado l'alta qualità degli obiettivi moderni, un così grande numero di transizioni influirà sensibilmente sulla qualità dell'immagine. L'intensità luminosa totale viene ridotta di oltre la metà ed inoltre, l'immagine perde molti dei suoi contrasti e della sua nitidezza a causa delle numerose e inevitabili riflessioni.

Solo recentemente si è riusciti a mettere a punto un sistema meno complicato e più efficace, dovuto in gran parte al fatto che i grandi fabbricanti di materiali ottici utilizzano ora le calcolatrici elettroniche che in un tempo relativamente breve e senza grandi spese consentono di rispondere alle esigenze dell'industria televisiva.

Esiste un obbiettivo per il formato vidicon 9×12 mm, avente una distanza focale di 8 cm ed un'apertura $f/1/4$, che ha permesso di realizzare una telecamera a colori (E.M.I.) di eccezionale compattezza. Il discriminatore dei colori è posto davanti al sistema ottico (Fig. 20), ciò che significa che questo è costituito in realtà da tre elementi che debbono naturalmente essere assolutamente identici. Disponendo lenti convergenti o divergenti di diametro sufficientemente grande davanti al sistema riflettente, la distanza focale effettiva della telecamera può essere ridotta a volontà a 2,5 cm oppure portata a 16 cm.

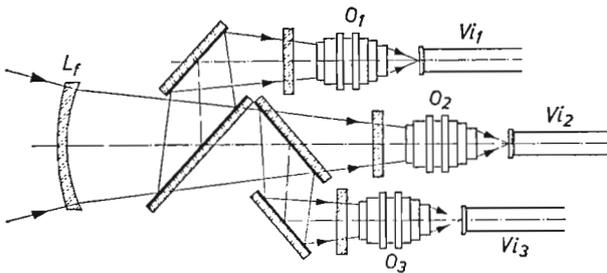


Figura 20. - Scomposizione dei colori davanti all'obbiettivo.

O_1, O_2, O_3 = obbiettivi identici; L_f = lente che permette di variare la distanza focale. V_{i1}, V_{i2}, V_{i3} = vidicon per i canali blu, verde e rosso.

Per un'altra telecamera con vidicon (Philips) si sono realizzati obbiettivi a focale variabile di alta qualità (S.O.M.-Berthiot e P. Angenieux) particolarmente convenienti per un discriminatore che non è a specchi ma ha un dispositivo a prismi come quello cui abbiamo accennato.

Il vantaggio del sistema a prismi posto fra l'obbiettivo e il tubo da ripresa è che i fasci convergenti che escono dal primo non si concentrano in maniera uguale nel vetro e nell'aria, ciò che ha come risultato un aumento della lunghezza utile senza far variare la distanza focale. Questo aumento è approssimativamente proporzionale all'indice di rifrazione dell'insieme dei prismi, ossia è di circa 1,5.

In questa telecamera tale sistema costituisce un blocco molto compatto, che comprende gli strati dicroici ed i filtri correttori, la cui lunghezza totale non supera i 70 mm circa.

Nel prossimo paragrafo tratteremo i principali dettagli fisici della telecamera a colori, cioè del sistema ottico e del discriminatore ed esamineremo anche la parte elettronica.

I tubi di ripresa.

Abbiamo già detto che vengono utilizzati per la televisione a colori solo l'Image-orthicon ed il Vidicon. Il primo è utilizzato negli « studi » nei paesi dove esiste una rete di televisione a colori. Il Vidicon che, per il suo principio di funzionamento, è un poco lento, non conviene molto per le scene con movimenti rapidi, e quindi non è adatto per l'impiego in « studi » di alta qualità; lo si utilizza soprattutto nella televisione scientifica e industriale. Data la sensibilità elevata dei tubi da ripresa, le telecamere con image-orthicon danno buone immagini con livelli di illuminamento compresi fra 3.000 e 6.000 lux, ma il loro impiego è delicato, indipendentemente dalle loro dimensioni e dal loro peso, dato che esse sono sempre munite di un ingombrante discriminatore a ottica ausiliaria.

Invece, le telecamere con Vidicon, specialmente quando sono equipaggiate con i sistemi ottici più moderni come quelli che abbiamo avanti descritto, hanno dimensioni e peso paragonabili alle telecamere classiche per bianco e nero; esse sono anche molto più facili da usare, a causa del loro più semplice principio di funzionamento.

Benché non sia stato ancora possibile superare l'inconveniente della maggiore inerzia cui abbiamo avanti accennato e della necessità

di una illuminazione più intensa, ciò che ostacola il lavoro in « studio », il Vidicon è meglio adatto per impieghi scientifici e industriali, dove i livelli di illuminazione molto elevati non costituiscono generalmente un inconveniente. È questa la ragione per cui particolarmente nell'insegnamento medico e chirurgico la telecamera a colori con Vidicon svolge un ruolo predominante, almeno allo stato attuale della tecnica.

Per completezza occorre dire che, negli ultimi anni, è stato realizzato un nuovo tubo di ripresa: il Plumbicon, particolarmente destinato alla televisione a colori. Il suo funzionamento e il suo impiego sono semplici quanto quelli del Vidicon ma, contrariamente a questo, il Plumbicon non presenta alcuna inerzia ed inoltre ha praticamente la stessa fotosensibilità dell'Image-Orthicon.

Non ci sembra necessario insistere sul funzionamento dell'Image-Orthicon e del Vidicon, o anche sui loro circuiti associati, sulle sorgenti di alimentazione, sulla deflessione dei pennelli elettronici, sulla cancellazione, ecc., i quali si basano sugli stessi principi del bianco e nero, ma occorre sottolineare che le regolazioni e i controlli debbono essere ancora più precisi e più costanti con il passare del tempo. In realtà, si tenga presente che si devono regolare tre tubi da ripresa con una precisione non usuale per quanto concerne l'equilibrio e le altre caratteristiche e anche il minimo scarto in questo esatto adattamento che avvenisse durante il funzionamento sarebbe sufficiente a determinare immediatamente conseguenze sia nella riproduzione dei colori sia nella precisa sovrapposizione delle tre singole immagini primarie sullo schermo del ricevitore.

I difetti di questo genere si producono quando i tre segnali video differiscono dai loro corretti valori teorici, ciò che risulta dal principio di funzionamento del discriminatore di colori, ma supponendo che il sistema funzioni normalmente, questi valori possono essere regolati facilmente; il monoscopio a bianco e nero ripreso dalla telecamera deve dare ampiezze eguali per i tre segnali R , V , B sull'oscilloscopio di controllo, esistente in tutte le telecamere a colori. Applicati al ricevitore, questi tre segnali video debbono dare sullo schermo una pura immagine a bianco e nero, senza la minima tendenza verso qualsiasi colore. Come è stato spiegato in un precedente paragrafo, questo risultato viene ottenuto se le intensità luminose delle sostanze luminescenti per i tre colori fondamentali sono nel rapporto 30 (rosso): 59 (verde): 11 (blu) in tutti i punti del monoscopio riprodotto. Quando i tre segnali sono eguali e tenendo conto delle differenze di rendimen-

to delle sostanze luminescenti, occorre che i tre amplificatori video del ricevitore vengano regolati in modo che i prodotti del guadagno per il rendimento per ciascuna delle sostanze siano nel rapporto 30 : 59 : 11 per i tre canali.

Dopo questa regolazione, qualunque mescolazione dei colori sarà automaticamente riprodotta con la massima esattezza, supponendo naturalmente che il rendimento degli amplificatori intermedi del sistema compreso fra i tubi da ripresa e il cinescopio del ricevitore (compresi anche questi tubi) rimanga costante.

Notiamo infine che il controllo delle ampiezze dei segnali video mediante l'oscilloscopio di controllo non può essere eseguito in maniera continua durante la trasmissione; può essere fatto solo quando sulla scena televisiva appare un oggetto bianco brillante, che dia così luogo a segnali massimi uguali per i tre canali.

Il gamma totale del sistema.

Indipendentemente dal guadagno costante degli amplificatori, che si ottiene mediante i normali metodi di stabilizzazione delle tensioni di alimentazione e mediante l'impiego di controreazione fra gli stadi, un'altra condizione molto importante per garantire l'assenza di difetti nei colori è una perfetta *linearità* delle tre reti amplificatrici tra i tubi da ripresa e il cinescopio.

In un amplificatore la linearità comporta una proporzionalità costante tra i segnali di entrata e di uscita, e tale proporzionalità deve rimanere inalterata dalle minime ampiezze di segnali fino alle massime ampiezze ammissibili. Per ciò che concerne i tubi da ripresa e i cinescopi, la linearità comporta la proporzionalità, da una parte, fra il flusso luminoso che cade sul fotocatodo e la corrente di segnale risultante e, d'altra parte, fra la tensione di controllo del cinescopio e il flusso luminoso emesso dalle sostanze luminescenti.

Le conseguenze disastrose di una trasmissione non lineare possono essere valutate mediante la Fig. 21a e b. Nella prima, sono mantenuti i rapporti fra le intensità dei tre colori primari r , v e b captati dai tubi della telecamera e le tre sostanze luminescenti alla ricezione emettono una luce nello stesso rapporto (r' , v' , b'); tutti i colori e le gradazioni di luminanza sono allora fedelmente riprodotti.

In mancanza di linearità (Fig. 21b), il rapporto dei colori primari sullo schermo del ricevitore risulta completamente differente (r'' , v'' ,

b'') ed allora, oltre alle gradazioni di luminanza, risultano alterati anche i colori.

Per verificare in maniera completa la linearità di tutto il sistema, questo può essere considerato come costituito da tre parti: i tubi da ripresa (dal fotocatodo fino al morsetto di uscita del segnale), gli am-

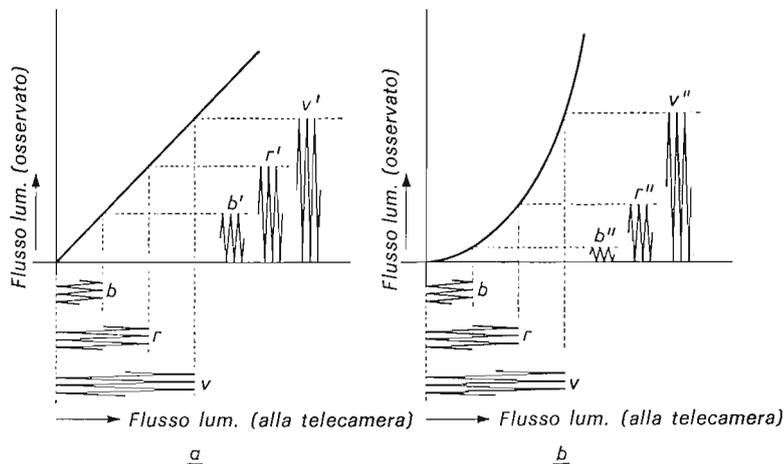


Figura 21. - Effetto della mancanza di linearità del canale di trasmissione sull'adattamento dei colori.

- a) Con una trasmissione lineare, le componenti di colore r' , v' e b' sono riprodotte nello stesso rapporto di r , v e b della scena originaria;
- b) Alterazioni delle componenti di colore r'' , v'' e b'' in seguito alla mancanza di linearità del canale di trasmissione.

plicatori (preamplificatori, amplificatore correttore e amplificatore del ricevitore) e il cinescopio (dal morsetto di entrata del segnale fino alle sostanze luminescenti). Le caratteristiche tipiche di queste tre parti sono rappresentate nelle Figg. 22a, b e c.

Mentre non si incontra molta difficoltà ad ottenere la linearità della parte amplificatrice (b) per tutta l'ampiezza di segnale necessaria, non avviene altrettanto per i tubi da ripresa e per il cinescopio (a e c). Nei due casi le caratteristiche dipendono da leggi elementari che concernono da una parte la conversione fotoelettrica (tubi da ripresa) e dall'altra parte la distribuzione della carica spaziale (cine-

scopio). Queste leggi possono essere indicate con approssimazione mediante semplici formule, per esempio:

$$\text{Vidicon} \quad : \quad i_s = C_1 \cdot \sqrt{L_i} = C_1 \cdot L_i^{0,5}$$

$$\text{Image-orthicon} \quad : \quad i_s = C_2 \cdot L_i = C_2 \cdot L_i^1$$

$$\text{Cinescopio} \quad : \quad L_0 = C_3 \cdot v_g^{2,2}$$

nelle quali:

$C_1, C_2, C_3 =$ costanti,

$L_i =$ flusso luminoso sul fotocatodo,

$L_0 =$ flusso luminoso della sostanza luminescente,

$i_s =$ corrente di segnale del tubo da ripresa,

$v_g =$ tensione di controllo del cinescopio.

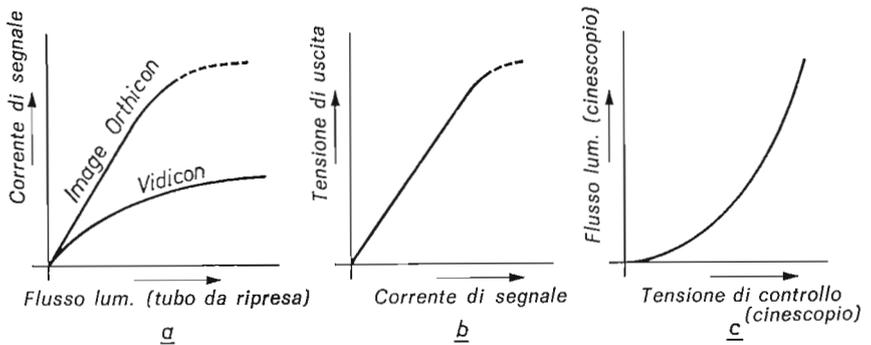


Figura 22. - Curve di risposta tipiche.
a) Tubi da ripresa; b) Amplificatori; c) Cinescopi.

Indipendentemente dalle costanti e dai vari parametri come corrente, tensione e flusso luminoso, queste formule si somigliano molto, dato che la sola differenza risiede negli esponenti degli ultimi termini (0,5-1-2,2). Questi esponenti sono per convenzione indicati con la lettera greca γ (gamma), di modo che attribuiremo alle curve (o funzioni) un certo *gamma*. Quello di una retta è 1, quello di una parabola è 2, e così di seguito. Un gamma di 2,2, come quello di un cinescopio a colori, significa una curva intermedia fra una parabola ordinaria ($\gamma = 2$) e una parabola di terzo ordine ($\gamma = 3$).

La caratteristica di un Vidicon con un gamma di 0,5 è una parabola ordinaria, ma con inversione delle coordinate (l'entrata è diventata il segnale di uscita e viceversa).

Un vantaggio di questa convenzione è che, se si debbono combinare successivamente diverse caratteristiche, la loro moltiplicazione (questo è il nostro caso) significa semplicemente la moltiplicazione dei loro gamma per avere il gamma della caratteristica risultante; non è affatto necessario conoscere i valori assoluti di ciascuna delle singole caratteristiche. Così si vede immediatamente che in un sistema che comprenda, per esempio, un image-orthicon ($\gamma = 1$), un amplificatore lineare ($\gamma = 1$) e un cinescopio ($\gamma = 2,2$) si ha un gamma totale di $1 \times 1 \times 2,2 = 2,2$; in altri termini il rendimento dei colori non risulterà corretto. In un caso del genere si deve inserire un correttore di gamma in un punto della parte amplificatrice, allo scopo di introdurre espressamente una caratteristica non lineare. Con un gamma di $1/2,2 = 0,45$ il gamma totale sarà allora di $1 \times 0,45 \times 2,2 = 1$ e la riproduzione sarà corretta.

Se si utilizza un Vidicon al posto di un image-orthicon, il gamma totale con un'amplificazione lineare sarebbe di $0,5 \times 1 \times 2,2 = 1,1$ e ciò comporterà solo la necessità di una leggera correzione. Occorre notare tuttavia che i valori indicati sono valori medi; i gamma dei cinescopi variano da 2,2 a 2,9 e quelli dei Vidicon possono essere compresi fra 0,4 e 0,7. Inoltre, le formule semplificate per le diverse caratteristiche del sistema possono essere considerate solamente come approssimazioni; mediante serie di potenze si otterrebbero valori più esatti, poiché le alte differenze dei gamma cui abbiamo accennato tendono a prodursi particolarmente alle ampiezze più piccole. Per questa ragione, anche con il Vidicon si utilizzano correttori di gamma nei tre canali; essendo regolabili i correttori, si può così assicurare un adattamento esatto tra le caratteristiche dei tubi da ripresa e quelli dei cinescopi ⁽¹⁾.

Non rientra nello scopo di questo libro descrivere il funzionamento di queste reti di correzione, ma dobbiamo citare che esse vengono utilizzate anche nelle telecamere da ripresa a bianco e nero, per evitare contrasti molto marcati nell'immagine, derivanti dalla forte curvatura della caratteristica del cinescopio.

⁽¹⁾ Per completezza occorre dire che il nuovo tubo da ripresa Plumbicon ha una caratteristica lineare come lo image-orthicon, malgrado il suo funzionamento sia uguale a quello del Vidicon.

Si noterà inoltre che è necessario avere la massima stabilità possibile dei circuiti utilizzati nella televisione a colori, maggiore di quella che si ha nelle immagini a bianco e nero. Nei due sistemi di televisione, i circuiti correttori di gamma non sono posti nel punto che sarebbe teoricamente corretto, ossia nel ricevitore, ma nell'amplificatore correttore che fa parte del trasmettitore. Non vi è alcuna obiezione a che questa correzione sia fatta nella telecamera, nel caso della televisione a circuito chiuso, poiché il ricevitore può sempre essere regolato con precisione osservando l'immagine riprodotta; ma per i programmi pubblici di televisione a colori questo procedimento è un po' rischioso, poiché la compensazione effettuata sul trasmettitore sarà possibile solo per un cinescopio medio; se la caratteristica di un particolare cinescopio differisce notevolmente dalla caratteristica media si avranno inevitabilmente colori non naturali.

Il controllo della linearità del sistema di trasmissione e le regolazioni dei tre correttori di gamma si effettuano mediante un monoscopio a bianco e nero, preferibilmente del tipo denominato « a scala di grigi », costituito da una serie da 8 a 12 strisce verticali aventi gradazioni che vanno da un nero profondo a un bianco puro (Fig. 23a). La procedura consiste nel regolare i tre amplificatori della telecamera alle stesse ampiezze massime mediante l'oscilloscopio di controllo (Fig. 23b), e poi nel regolare l'amplificatore del ricevitore fino a che il bianco del monoscopio appaia come bianco sullo schermo; successivamente si regolano i tre correttori del gamma affinché le diverse densità di grigio siano riprodotte come grigi veramente neutri,

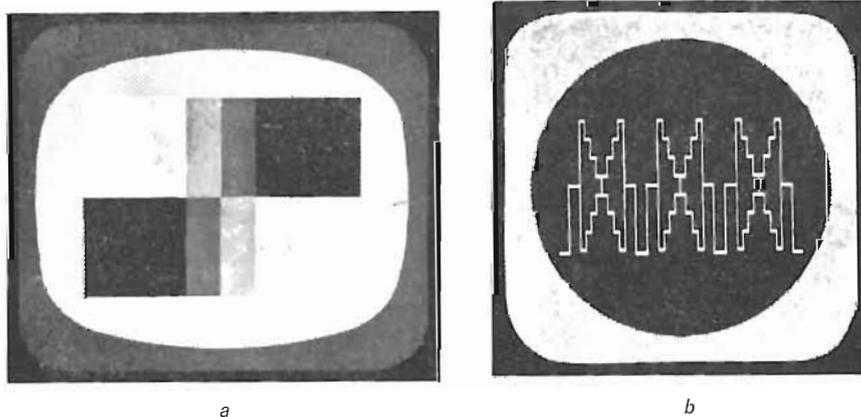


Figura 23. - a) Monoscopio di grigi; b) Oscillogramma della corrente di segnale nei tre canali di amplificazione per un guadagno correttamente regolato.

senza alcuna traccia di colorazione. Illuminando poi il monoscopio con una luce giallastra o verde-blu, se i correttori di gamma sono stati convenientemente regolati deve apparire sullo schermo la stessa tinta per tutte le gradazioni. Altrimenti è necessario apportare ulteriori correzioni.

Sovrapposizione dei colori.

L'immagine a colori nel ricevitore viene prodotta per mescolazione additiva delle tre immagini dei colori primari rosso, verde e blu ed è evidente che non si può ottenere un'immagine perfetta se queste tre immagini non sono esattamente sovrapposte le une sulle altre; in caso contrario, l'effetto è lo stesso di quello che si ha nella stampa con una cattiva tricromia, gli oggetti appaiono contornati da frange colorate.

Nella televisione a colori, una sovrapposizione difettosa dei colori può essere dovuta a molte differenti cause. Essa può avere origine nella telecamera o nel ricevitore e si deve cercare di evitare che essa avvenga alle due estremità della catena. I mezzi correttivi risultano piuttosto complicati e non è facile regolarli e farli funzionare correttamente. Esamineremo le cause di errori nella telecamera, supponendo anzitutto che il sistema ottico sia effettivamente corretto (come generalmente avviene attualmente) e, in secondo luogo, che il discriminatore dei colori non dia origine ad alcun difetto cromatico o di rifrazione; in altri termini, supponendo che la difettosa sovrapposizione nella telecamera sia dovuta solo a una disuniforme scansione dei tre tubi da ripresa. I difetti possibili di scansione di due tubi da ripresa sono rappresentati, molto esagerati, nella Fig. 24. Le varie cause sono le seguenti:

- a) Centratatura: i difetti possono avere un'origine puramente ottica; per esempio gli assi dei tubi della telecamera non coincidono con gli assi ottici.
- b) Ampiezza: si possono avere difetti nelle deflessioni di riga e di quadro.
- c) Linearità: si possono avere difetti nelle deflessioni di riga e di quadro.

- d) Rotazione: i sistemi di deflessione probabilmente sono ruotati l'uno rispetto all'altro.
- e) Deformazione a rombo: i campi di deviazione non sono perpendicolari fra loro in un sistema.
- f) Deformazione trapezoidale: i campi di deviazione non sono omogenei.
- g) Deformazione a cuscinetto o a barilotto: i campi di deviazione non sono omogenei.
- h) Campi magnetici esterni: i difetti risultanti possono assumere molte forme e possono essere costanti oppure possono variare periodicamente.
- i) Deformazioni ad S: dovuti a campi esterni quando il sistema di deflessione non è di alta qualità.

Si deve notare che tutti questi difetti di deflessione non sono caratteristici solo delle telecamere a colori; essi possono avvenire con probabilità anche maggiore nelle telecamere a bianco e nero, soprattutto poiché forse si pone un po' meno attenzione alla loro importanza e si pone meno cura nell'eliminarli. Una ragione è che una non esatta sovrapposizione delle tre immagini dovute ad una mediocre regolazione è immediatamente percepibile nella televisione a colori, mentre gli stessi difetti geometrici e di deformazione restano inavvertiti nella televisione a bianco e nero, dato che l'occhio è meno abile a distinguerli.

Le normali telecamere sono naturalmente dotate di regolazione dell'ampiezza di deflessione, di linearità, di spostamento e di rotazione, ma le telecamere a colori debbono essere dotate di ulteriori sistemi per aumentare la precisione di queste regolazioni per ciascuno dei tre canali. Inoltre il progetto dei circuiti associati deve assicurare quanto più possibile una grande stabilità, sia a breve che a lungo termine, soprattutto in rapporto alle variazioni di temperatura; i tre tubi da ripresa con i loro sistemi di deflessione debbono essere allineati, mediante riferimenti precisi, con gli assi ottici del discriminatore dei colori e debbono anche poter ruotare singolarmente attorno ai loro assi.

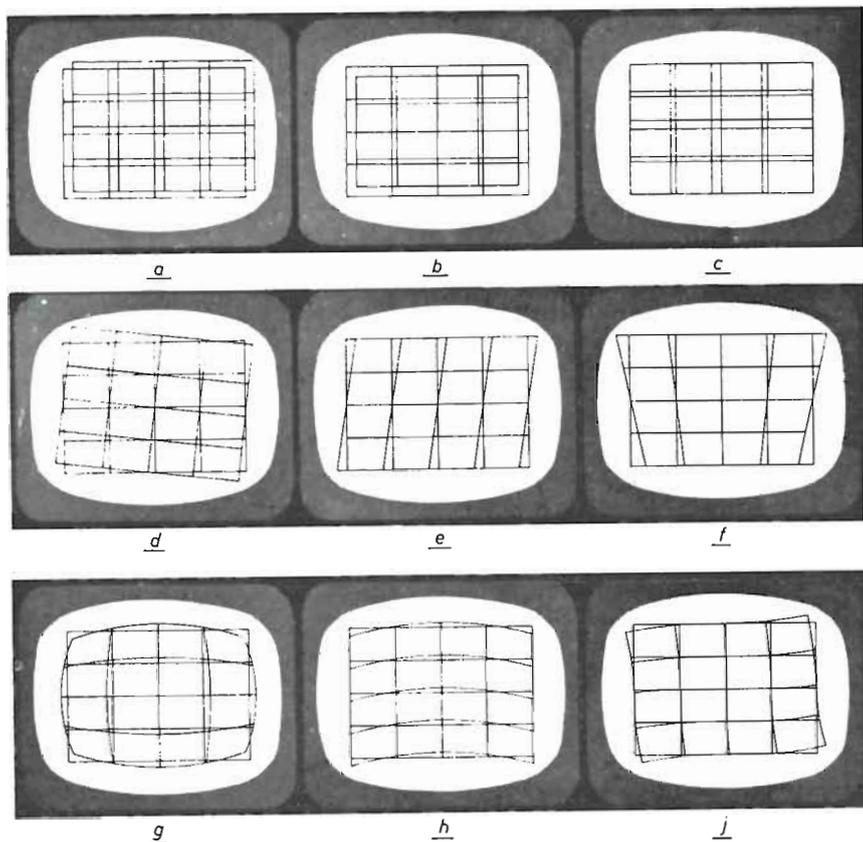


Figura 24. - Esempi di spostamenti di colori nella telecamera (vedi testo).

Si deve inoltre curare maggiormente la schermatura contro i campi elettrici e magnetici esterni. In generale, le precauzioni da prendere sono tanto più impegnative quanto più piccoli sono i tubi da ripresa; da ciò segue che sono da prevedere le maggiori difficoltà con i piccoli vidicon (dimensioni di immagine $9,6 \times 12,8$ mm) piuttosto che con i grandi tubi image-orthicon (24×32 mm).

Infine, a parte i comandi meccanici, la quasi totalità delle regolazioni elettriche di precisione non sono situate nella telecamera, ma sul banco di controllo, dato che solamente in questo posto è possibile agire sulla sovrapposizione delle immagini mediante un monitor di controllo.

Il banco di controllo.

Oltre le regolazioni elettriche cui abbiamo accennato nel precedente paragrafo, le quali generalmente sono combinate in un solo blocco con i circuiti generali di deviazione, il banco di controllo comprende anche i tre amplificatori video (amplificatori di correzione) e gli alimentatori con i necessari circuiti di stabilizzazione, per citare solo gli elementi principali (Fig. 25). Esso deve anche contenere l'indispensabile oscilloscopio di controllo delle forme d'onda e un televisore a colori o almeno un televisore a bianco e nero, per controllare immediatamente la sovrapposizione delle tre immagini, benché un controllo a bianco e nero non possa mai essere altrettanto preciso come con un televisore a colori, dato che, come abbiamo detto, uno spostamento dei contorni è meno facilmente avvertibile in bianco e nero.

Non è necessario qui trattare i circuiti, ma può essere utile citare una o due particolarità dell'amplificatore video. Analogamente alle apparecchiature televisive a bianco e nero, i segnali molto deboli forniti dai tubi da ripresa della telecamera vengono applicati ai preamplificatori nella stessa telecamera. Questi sono realizzati con lo scopo molto importante di ottenere un'amplificazione, esente da rumori parassiti, dei segnali di entrata, i quali sono dell'ordine di qualche decimo di millivolt, o anche meno. Amplificati a qualche decimo di volt, i segnali risultano allora sufficientemente ampi da non essere influenzati da interferenze, dovute alla rete di alimentazione o originate da altre sorgenti, lungo il loro tragitto fino al banco di controllo, tragitto che può essere anche di varie centinaia di metri. Generalmente, le telecamere a colori richiedono due o anche tre cavi, per la semplice ragione che un solo cavo, che contenga tutti i conduttori necessari, sarebbe molto ingombrante e non flessibile.

Gli amplificatori del banco di controllo comprendono, come sempre, i mezzi per correggere la curva di risposta (a meno che questa regolazione non venga effettuata nei preamplificatori), il correttore di apertura e infine, ciò che però non è meno importante, i correttori di gamma. In essi i segnali di soppressione (cancellazione) sono mescolati con i segnali in arrivo ed una attenzione particolare viene portata affinché il livello di bianco e nero sia costante; i più piccoli errori nel livello del nero, specialmente, tendono a snaturare i colori nelle parti oscure dell'immagine.

I tre segnali di colore, mescolati con i necessari impulsi di cancellazione, sono sufficienti per la televisione a circuito chiuso e possono

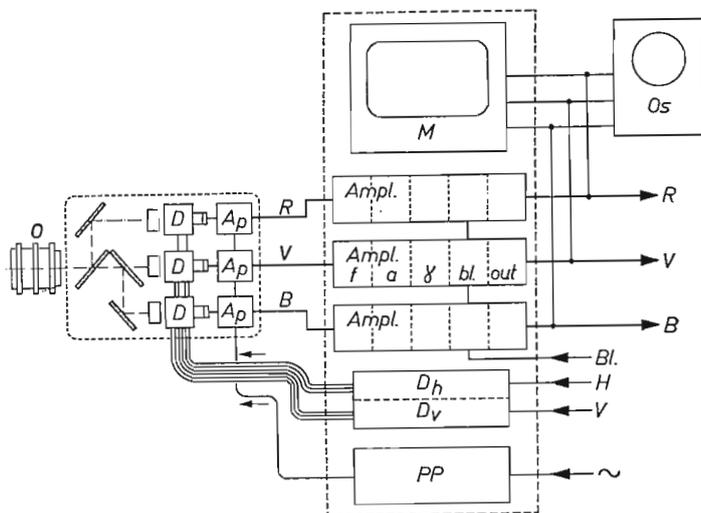


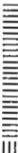
Figura 25. - Schema di principio di un sistema di trasmissione televisiva a colori.

A_p = preamplificatore; $Ampl$ = amplificatori di correzione comprendenti le correzioni di frequenza e di gamma, gli stadi di cancellazione e di uscita; B_i = impulso di cancellazione; D = giogo di deflessione; D_h = base dei tempi orizzontale; D_v = base dei tempi verticale; H = impulso di sincronismo di riga; M = Monitore di controllo a bianco e nero; O = obiettivo; O_s = oscilloscopio a raggio catodico; PP = alimentazione; V = impulso di sincronismo verticale; R, V, B = segnali di colore.

essere applicati direttamente al ricevitore o al monitore a colori, mediante tre cavi coassiali. Invece, quando si effettua la trasmissione mediante antenna, i tre segnali vengono anzitutto combinati mediante un sistema di codificazione, (vedi cap. IV) per formare un solo segnale di immagine a colori il quale, dopo l'aggiunta degli impulsi di sincronismo, viene applicato come modulazione al trasmettitore (segnale a colori composto).

Quando si impiega più di una telecamera a colori, o se l'immagine fornita da una telecamera deve essere combinata con diapositive o con un film, i segnali di immagine a colori vanno prima ad un banco di miscelazione, come nella televisione a bianco e nero.

Tratteremo in seguito il sistema molto complicato usato per combinare i tre segnali di colore per formare il segnale video a colori, ma esamineremo anzitutto i sistemi di riproduzione a colori attualmente usati.



CAPITOLO III.

SISTEMI DI RIPRODUZIONE



Nei primi paragrafi è stato esaminato il principio fondamentale sul quale si basa la televisione a colori naturali. Riassumendo brevemente, i colori della scena da trasmettere vengono suddivisi secondo un rapporto determinato nelle loro tre componenti primarie rossa, verde e blu, che sono poi convertite in tre segnali video R , V e B (Fig. 11). Qualunque sia il modo con cui questi segnali raggiungono il ricevitore, per onda portante o per cavo, i segnali sono utilizzati per dare tre immagini, una per ciascun colore primario, che sono sovrapposte per formare un'immagine unica. Nella Fig. 11 si vede come tali tre immagini sono prodotte da un numero uguale di piccoli tubi da proiezione le cui sostanze luminescenti emettono luci di differenti colori, dato che queste immagini vengono proiettate simultaneamente su uno schermo traslucido. In seguito alla mescolazione additiva della luce che esce dallo schermo, la scena trasmessa viene vista nei suoi colori naturali. Esistono altri mezzi per raggiungere lo stesso risultato e di questi tratteremo nei paragrafi che seguono.

Il sistema a sequenza di colori.

Nelle prime esperienze tendenti a realizzare ciò che attualmente chiamiamo la televisione a colori, ci si trovava dinanzi a due ostacoli, che erano insormontabili con i mezzi allora disponibili. Il primo di questi era la scomposizione continua della luce nelle sue tre componenti primarie, per esempio mediante gli specchi dicroici. Il secondo ostacolo consisteva nell'impossibilità di applicare ai tre tubi da ri-

presa della telecamera e ai tre cinescopi del ricevitore deflessioni elettriche in modo che potesse essere ottenuta la sovrapposizione esatta delle tre immagini sullo schermo del ricevitore, così da riprodurre la scena nei colori naturali. Queste due difficoltà possono essere superate se si trae profitto dall'inerzia dell'occhio umano, in un senso ancora più ampio rispetto a quello che consente la ricostruzione, riga per riga, delle immagini televisive.

Data questa inerzia, uno stimolo molto breve dà luogo ad una impressione visiva più lunga, dovuta ai fenomeni chimici ed elettrici complessi che avvengono nella stimolazione dei bastocini, dei coni e delle cellule nervose e che comportano certi intervalli di tempo per l'eccitazione e la diseccitazione. Questa inerzia influisce non solamente sulla nostra sensazione di intensità luminosa, ma anche su quella del colore degli oggetti luminosi. Se con intervalli minori di un decimo di secondo si fanno avvenire impulsi luminosi di differenti colori, que-

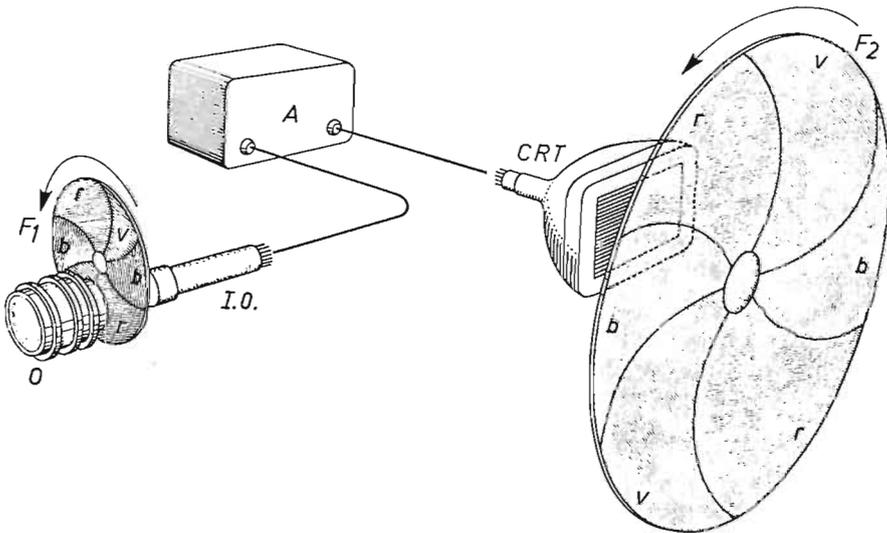


Figura 26. - Principio del sistema di trasmissione sequenziale dei colori.

A = amplificatore video; CRT = cinescopio a bianco e nero; F_1, F_2 = filtri colorati rotanti (r, v, b = settori colorati in rosso, verde e blu); I.O. = image-orthicon; O = obiettivo.

sti non possono essere percepiti con i loro colori individuali, ma invece l'occhio ricava la sensazione di un colore unico, conforme con le leggi che governano i miscugli additivi della luce. Questa constata-

zione ha condotto ad un primo metodo di trasmissione televisiva a colori (Fig. 26).

Un disco in rapida rotazione che conteneva filtri aventi i colori primari rosso, verde e blu in successione (F_1) è montato tra l'obbiettivo e il tubo da ripresa di una normale telecamera, in modo che nel tubo vengano prodotte immagini successivamente rossa, verde e blu.

La velocità di rotazione del disco a settori colorati veniva regolata, rispetto alla velocità di deflessione, in maniera tale che la transizione tra un colore primario ed il successivo era molto prossima al ritorno verticale del fascetto di analisi (dal basso in alto nella telecamera). Nel segnale video così prodotto, ognuna delle tre trame conteneva così una successione delle componenti rossa, verde e blu della scena, e il ciclo successivo cominciava con la quarta trama.

Amplificato in maniera normale, questo segnale poteva essere applicato ad un cinescopio unico, davanti al quale ruotava un disco sufficientemente grande con settori colorati (F_2), che si muoveva dall'alto verso il basso. Non era difficile assicurare una rotazione sincrona e in fase fra i due dischi mediante impulsi di sincronismo e mediante un impulso speciale di messa in fase e le tre trame colorate venivano così riprodotte in successione sul ricevitore. Il telespettatore aveva allora una visione della scena nei suoi colori corretti.

Inconvenienti del sistema a sequenza di colori.

Il sistema che abbiamo descritto è noto come sistema C.B.S., dal nome della Columbia Broadcasting System degli Stati Uniti, che assunse il compito enorme del suo sviluppo. Nel 1950 i suoi sforzi furono coronati da successo ed il sistema fu adottato dalla F.C.C. (Federal Communication Commission) come norma per la televisione a colori negli Stati Uniti. Una lotta a colpi di milioni di dollari fra questo sistema e un altro che non utilizzava i dischi e che era patrocinato principalmente dalla R.C.A. (Radio Corporation of America) sembrava terminasse in favore della C.B.S.

Benché questa realizzazione potesse essere considerata come il primo passo nel campo della televisione a colori, così da costituirne una prima pietra molto importante, questa soluzione del problema era ben lontana dall'essere considerata come soddisfacente. Anche se la grande perdita di sensibilità della telecamera dovuta ai filtri, aggiunta

alla perdita di luminosità del ricevitore, erano accettate in mancanza di meglio, restava sempre una seria sproporzione fra le dimensioni del ricevitore e quelle dello schermo, causate dall'esistenza dei filtri. Inoltre si doveva tener conto delle imperfezioni inevitabili risultanti dall'unione fra fenomeni elettronici e movimenti meccanici.

Infine il più grande inconveniente era (e rimane) che se il segnale a colori doveva essere trasmesso a radiofrequenza, o la larghezza di banda del canale doveva essere molto grande, oppure se la larghezza di banda adottata rimaneva invariata, nel caso di movimenti rapidi lo schermo mostrava un forte sfarfallio con frange colorate nei contorni degli oggetti.

La ragione è la seguente. Come si sa, la banda attuale di 7 MHz (ivi compreso il canale audio) può con cura essere sufficientemente larga da contenere la trasmissione di 50 quadri (mezze immagini) al secondo sulla base di $625/2 = 312,5$ righe di analisi. Ora se le tre immagini rossa, verde e blu si succedono l'una all'altra nel sistema sequenziale, si hanno solo $50 : 3 = 16, \frac{2}{3}$ quadri dello stesso colore prodotti ogni secondo, ciò che è insufficiente ad evitare lo sfarfallio. Un effetto ancor più sfavorevole era costituito dalle frange colorate e dall'alterazione dei colori sui contorni degli oggetti in movimento. Occorre aggiungere che i colori venivano accentuati dallo sfarfallio di righe colorate dell'interlacciamento, dato che dovevano svolgersi sei quadri prima che una data riga riapparisse nello stesso colore primario.

Questi effetti molto sgradevoli potevano essere eliminati solo aumentando considerevolmente il numero di quadri al secondo ma a parità di numero di righe per quadro, ciò avrebbe comportato un aumento della velocità di analisi, e quindi una maggiore larghezza di banda. Una riduzione del numero di righe con un aumentato numero di quadri non avrebbe influito sulla larghezza di banda, ma si sarebbe avuta una perdita di definizione. Sarebbe stato senza dubbio possibile trovare un compromesso utilizzando numeri totalmente diversi di righe e di quadri, ma in questo caso si sarebbe rinunciato ad uno degli aspetti più importanti di tutto il sistema, ossia alla compatibilità.

Questo termine esprime la condizione secondo cui i segnali trasmessi a colori possono anche essere riprodotti da qualunque televisore a bianco e nero esistente, dando una buona immagine a bianco e nero. Evidentemente questa esigenza di compatibilità costituì una delle più gravi difficoltà per i vari sistemi di televisione a colori che si svilupparono successivamente.

Il sistema simultaneo.

Poco dopo l'epoca in cui il sistema C.B.S. cominciò a diventare una possibilità pratica, altre esperienze venivano fatte sulla base di principi completamente nuovi e differenti. Tra questi, un sistema interamente elettronico senza filtri rotanti giungeva alle prove pratiche; in particolare la R.C.A. parve essere arrivata alla soluzione finale con un sistema a sequenza di righe e poi anche a sequenza di punti. Nel primo, il colore primario varia ad ogni riga e non ad ogni quadro, mentre nel secondo esso varia ad ogni elemento di immagine. Ciò eliminò il problema dello sfarfallio e sopprime completamente le frange colorate sui contorni degli oggetti. La larghezza di banda del canale televisivo poteva rimanere inalterata e la compatibilità era certamente assicurata.

Questi miglioramenti nel campo dell'analisi furono resi possibili da una parte dalla commutazione elettronica dei primari video e, dall'altra parte, dalla realizzazione di un cinescopio a colori nel quale le tre sostanze luminescenti erano disposte sullo schermo a righe alternate estremamente sottili oppure a piccolissimi punti. I tre tubi da ripresa nei quali le immagini della scena si riproducevano in maniera assai primitiva ma tuttavia efficace nei sui colori primari costituivano un sistema « simultaneo », mentre il ricevitore era ancora del tipo sequenziale. Così restava ancora da risolvere il problema del cinescopio del ricevitore. Questo era il problema più difficile e che ha maggiormente ritardato l'evoluzione finale di un sistema, che è ora universalmente adottato.

Benché l'applicazione delle tre sostanze luminescenti a righe o a punti poté con successo essere ottenuta con la precisione voluta, la deflessione necessariamente complicata e molto precisa per il fascio elettronico non poté andare oltre lo stadio sperimentale.

La soluzione finale fu impostata dalla decisione di realizzare un sistema completamente simultaneo, cioè nel quale i tre quadri colorati vengono riprodotti simultaneamente nel ricevitore. Ciò era possibile se il cinescopio con il suo schermo del tipo tricromatico (che era già un fatto compiuto) poteva essere realizzato con tre cannoni elettronici separati, così da dirigere automaticamente i rispettivi pennelli elettronici, modulati con il segnale video, sui punti rosso, verde e blu dello schermo durante la normale scansione. Un tale tubo (« shadow mask tube », ossia tubo a maschera, della R.C.A.), che rispondeva

a queste condizioni, costituisce l'unica soluzione pratica sino ad oggi trovata e per tale motivo lo descriveremo con maggiore dettaglio; il problema di un sistema di televisione a colori simultanei fu così risolto in maniera soddisfacente, apportando miglioramenti importanti sotto molti aspetti al precedente sistema a colori sequenziali.

L'ingegnoso metodo di realizzazione di un sistema totalmente simultaneo basato su questo cinescopio e lo sviluppo di questo sistema a uno stadio di perfezione che potesse rispondere favorevolmente per molti anni alle prevedibili esigenze tecniche costituiscono un esempio unico nella storia dell'elettronica. Per migliorare la situazione creata dal sistema C.B.S., che era stato appena normalizzato dalla F.C.C., alcuni laboratori di ricerca degli Stati Uniti unirono i loro sforzi per fondare il National Television System Committee (N.T.S.C.) allo scopo di suddividere i problemi al fine di intensificare la ricerca ed elaborare il più rapidamente possibile un sistema televisivo a colori migliore del sistema C.B.S.

In un intervallo di tempo molto breve, di una dozzina di mesi, il risultato dei lavori fu sottoposto alla F.C.C., e le idee nuove contenute in tali risultati non sono meno affascinanti, visti retrospettivamente, rispetto alle complesse ricerche teoriche compiute ed alla ingegnosità della realizzazione pratica. Visto nel suo insieme, il sistema N.T.S.C. può essere considerato come un trionfo della collaborazione e degli sforzi umani.

Nel 1951 questo sistema fu adottato dalla F.C.C. come sistema americano normalizzato di televisione a colori. Di conseguenza il sistema C.B.S. non fu più adottato per la diffusione pubblica ma, essendo relativamente semplice, esso può avere ancora impiego, per esempio nelle applicazioni a circuito chiuso o con trasmettitori a fascio, non normalizzati e di debole potenza, particolarmente per applicazioni industriali della televisione a colori. Un grande vantaggio di questo sistema, che non deve essere sottovalutato, è l'assoluta assenza di difetti di sovrapposizione; però come abbiamo già detto, esso richiede una massima precisione sia nella realizzazione che nel funzionamento dell'apparecchiatura.

Il tubo a maschera.

Questo tubo si basa sul principio seguente. Le tre sostanze luminescenti che emettono luce nei colori primari rosso, verde e blu, sono applicate sulla faccia frontale del cinescopio sotto forma di piccoli

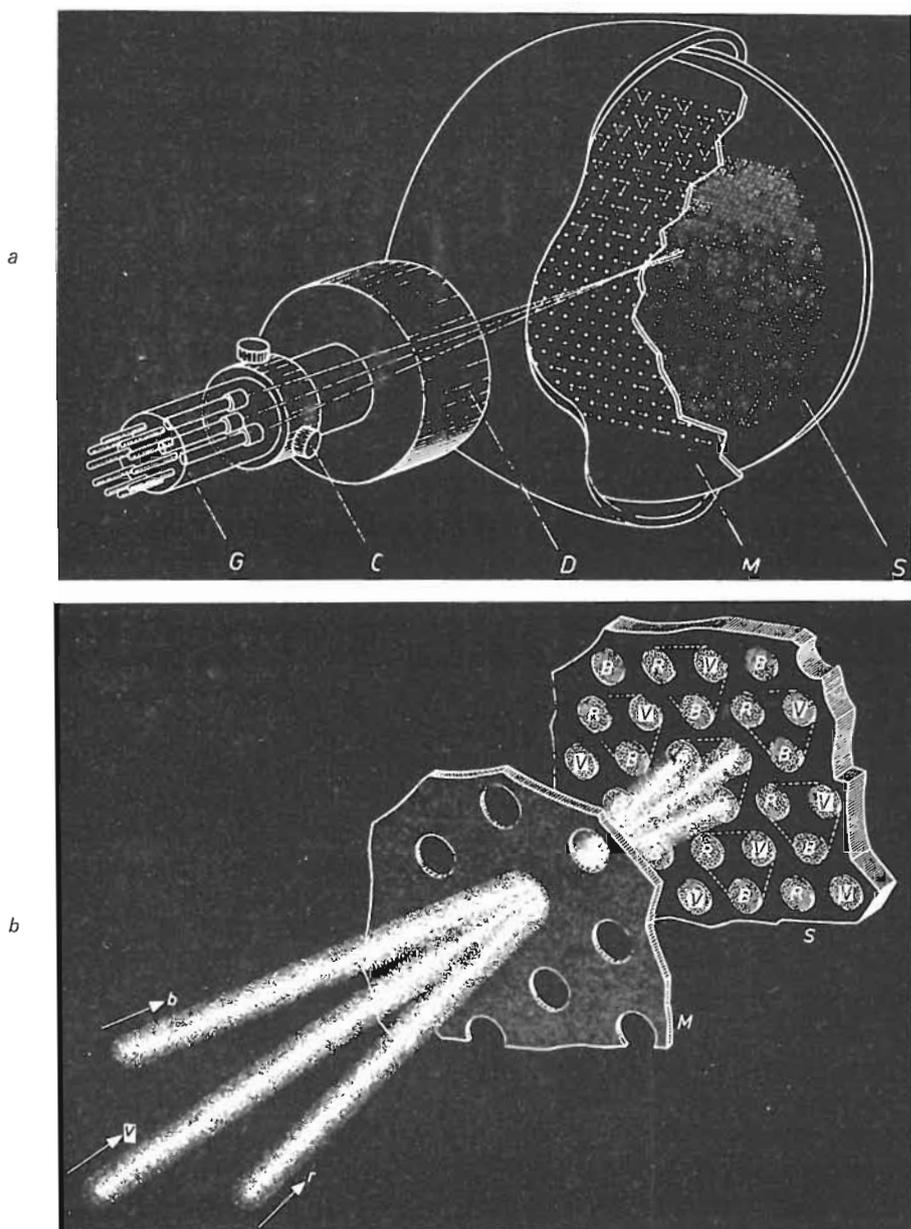


Figura 27. - Cinescopio a maschera. - a) sezione; b) dettaglio ingrandito dei tre pennelli elettronici che passano attraverso la maschera; b, v, r = pennelli elettronici per i puntini luminosi blu, verde e rosso; C = sistema di convergenza; D = sistema di deflessione; G = base del tubo con i tre cannoni elettronici; M = maschera; S = schermo luminescente sotto forma di terne di punti luminosi.

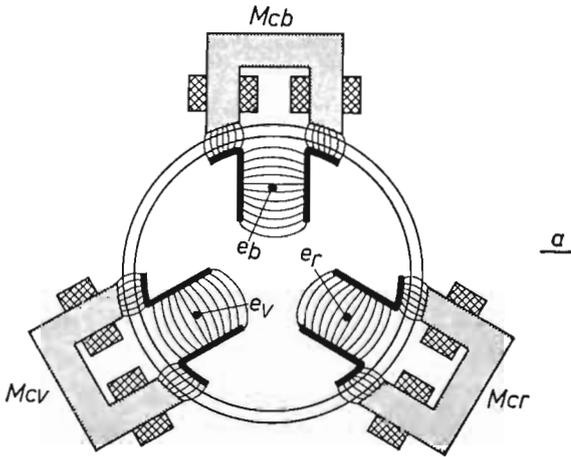
a

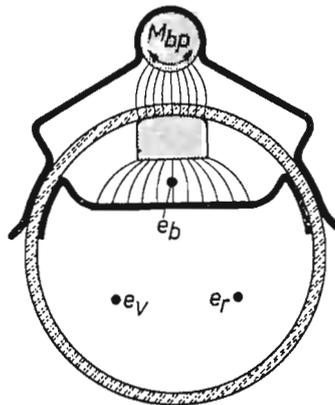
Figura 28.

a) sistema di convergenza per cinescopio a maschera.

b) Magnete di spostamento del blu.

e_b , e_v , e_r = pennelli elettronici per i puntini luminosi blu, verde e rosso;

M_{bp} = magnete di spostamento del blu;
 M_{cb} , M_{cv} , M_{cr} = magneti di convergenza per il blu, verde e rosso.

b

punti, disposti in maniera tale da costituire una rete regolare di piccoli triangoli o terne (R , V e B nella Fig. 27). Il diametro di ogni punto è di circa 0,42 mm e la loro distanza reciproca è di circa 0,60 mm. Alla distanza normale di visione, queste dimensioni sono relativamente così piccole che il potere risolutivo dell'occhio (o acutezza visiva) non riesce a distinguere i singoli punti o anche le terne. In realtà, ciò significa che per differenti intensità luminose dei tre puntini luminosi delle terne, l'occhio non può percepire i singoli colori dei puntini luminosi, ma, e questa è l'essenza del sistema, solamente il miscuglio additivo dei colori. Così, indipendentemente dai problemi tecnologici e pratici dell'applicazione delle sostanze luminescenti secondo la disposizione prevista, il principio fondamentale di questo tubo è molto semplice.

La principale difficoltà risulta dal fatto che i tre pennelli elettronici, modulati rispettivamente dai segnali R , V e B e che cadono sulle terne nella loro deflessione normale sullo schermo, debbono colpire il punto colorato utile in ogni gruppo. Benché forse si tratti della più elegante delle soluzioni, il metodo seguito per raggiungere questo risultato è di una semplicità sorprendente ed assolutamente infallibile; si tratta della *maschera* (M) posta a breve distanza dallo schermo (Figura 27a e b). Si vede immediatamente dalla figura che quando i tre pennelli elettronici si incrociano su un foro della maschera, essi sono costretti a colpire ciascuno, ogni volta, il desiderato punto di colore della terna. Si ha così un foro nella maschera per ogni terna.

Convergenza statica.

Non resta allora che comandare i pennelli elettronici in maniera che essi esplorino lo schermo incrociandosi sempre nel piano della maschera, ossia occorre che il punto di *convergenza* si trovi su questo piano. Ciò sarà molto semplice al centro dello schermo, dato che è necessario solo che i cannoni elettronici siano disposti con un angolo leggermente obliquo, ma in pratica si è rilevato che, malgrado una accurata prerogolazione, si hanno piccole deviazioni, che debbono essere corrette mediante deboli campi magnetici.

A questo scopo sono montate nel collo del cinescopio tre coppie di espansioni polari, immediatamente avanti ai cannoni elettronici, in modo che i pennelli elettronici siano obbligati ad attraversare i loro campi.

In corrispondenza ad essi, ma all'esterno del cinescopio, sono posti tre piccoli elettromagneti, i cui poli sono esattamente allineati con le espansioni polari interne. La variazione delle correnti applicate a questi elettromagneti provoca la formazione di deboli campi magnetici fra le espansioni polari, sufficienti per deviare radialmente i pennelli elettronici (Fig. 28a e b).

Una deviazione radiale non è tuttavia sufficiente ad assicurare la convergenza dei tre fasci in un punto comune al centro della maschera; almeno uno di essi deve poter essere spostato nell'altra direzione, preferibilmente tangenzialmente. A questo scopo si è scelto il pennello del blu e si fa in modo che questo attraversi una seconda coppia di espansioni polari che, quando sono magnetizzate da un magnete di *spostamento laterale del blu*, sposta il pennello orizzontalmente. Così, con questi quattro magneti, i tre pennelli elettronici possono convergere sufficientemente nel centro della maschera. In questo caso si ha la *correzione della convergenza statica*.

Convergenza dinamica.

Il problema della convergenza diviene tuttavia più complicato se si tiene conto dell'effetto di deflessione dei tre pennelli elettronici. Come mostra la Fig. 29a il punto di convergenza tende allora a spostarsi molto al di là della maschera (guardando dallo schermo), di modo che i pennelli elettronici non convergono più su un unico foro della maschera, ma coprono vari fori su essa e quindi eccitano vari punti dello schermo.

Ognuno dei tre pennelli elettronici subisce una differente deformazione geometrica del suo movimento di deflessione, ciò che dà luogo ad un difetto molto evidente di sovrapposizione di colori come mostra, in maniera alquanto esagerata, la Fig. 29.

Quanto alla resa dei colori, ossia alla purezza dei colori, questa non viene influenzata, poiché i tre pennelli elettronici colpiscono sempre i punti luminescenti del corretto colore, anche se essi non si trovano nella stessa terna.

Il difetto di convergenza suddetto deve naturalmente essere evitato, mediante una correzione di convergenza *dinamica*. Le espansioni polari e i magneti previsti per la correzione della convergenza statica servono contemporaneamente alla correzione dinamica; frattanto, mentre una corrente continua di polarità ed intensità adeguate basta

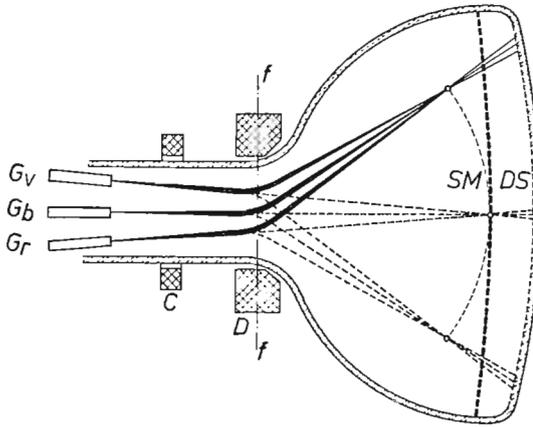
alla correzione statica, occorrono per ogni cannone correnti di correzione variabili alle frequenze di riga e di quadro. La Fig. 29b mostra che approssimativamente si debbono avere correnti di forma parabolica alle quali si dà l'asimmetria necessaria sovrapponendo una corrente a dente di sega. Segue che ogni cannone necessita così di quattro correnti supplementari:

- a) una corrente parabolica alla frequenza di riga;
- b) una corrente a dente di sega alla frequenza di riga;
- c) una corrente parabolica alla frequenza di quadro;
- d) una corrente a dente di sega alla frequenza di quadro.

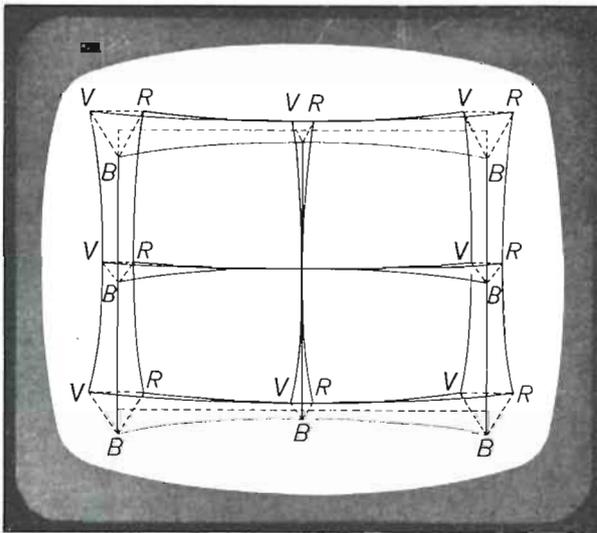
Considerando le correnti continue di correzione della convergenza statica e la correzione orizzontale del blu, si hanno così 16 differenti controlli per avere una convergenza ottima su tutta la superficie della maschera.

Occorre aggiungere qualcosa sulla regolazione reale di questi controlli così sensibili, poiché questo grande numero di mezzi di correzione influisce in ultima analisi su ciascun pennello in base agli effetti totali e complessivi, anche se vi è una sola coppia di espansioni polari in causa. Ciò significa che ogni pennello deve compiere uno spostamento correttivo in una sola direzione (Fig. 28a), il blu solo verticalmente e gli altri due, il rosso e il verde, rispettivamente dal basso — destra e dal basso — sinistra andando a 30° rispetto all'asse orizzontale. Per prendere il caso estremo, ciò significa che se si rende necessario avere un piccolo spostamento *verticale*, ad esempio, del pennello del rosso, si avrà un spostamento orizzontale quasi doppio ($\cotg 30^\circ$). Di conseguenza, la più piccola regolazione di uno qualunque di questi comandi comporta generalmente una ripetizione quasi all'infinito della regolazione di tutti gli altri.

Noi non tratteremo qui i circuiti di controllo ed il metodo per ottenere le correnti paraboliche ed a dente di sega necessarie, partendo dalle deflessioni di riga e di quadro, ma dobbiamo sottolineare una condizione fondamentale: le correnti debbono essere stabili e costanti, ciò che forse è anche più importante che per le altre parti della catena televisiva a colori, poiché la regolazione e la rirregolazione della convergenza è molto più difficile e richiede molto più tempo, anche per una persona pratica, rispetto a tutte le altre regolazioni necessarie fra il tubo di ripresa e il ricevitore.



a



b

Figura 29. - Errori di convergenza dinamica.

a) Causa.

b) Effetto visto sullo schermo.

C = unità di convergenza; D = gioco di deflessione; DS = schermo con puntini luminosi; G_b, G_v, G_r = cannoni elettronici; SM = maschera; $f-f$ = piano di deflessione.

Purezza dei colori.

Riferendoci alla Fig. 29 il lettore potrà domandarsi perché, quando i raggi incidenti arrivano obliquamente ai bordi dello schermo, i fori della maschera restano ancora allineati con le terne di cui lo schermo è costituito. La ragione è la seguente. Il raggruppamento appropriato dei punti luminescenti viene assicurato prendendo per base la maschera stessa con i suoi fori. Questa maschera viene fabbricata secondo una riproduzione fotografica di un disegno a grande scala perfettamente eseguito, e questa riproduzione viene ridotta e poi stampata; inizialmente piana, la maschera poi viene pressata per assumere una forma leggermente sferica. Viene poi utilizzata una apparecchiatura di precisione per metterla esattamente al suo posto rispetto alla faccia anteriore del cinescopio, e questa è la posizione che la maschera deve normalmente occupare nel tubo finito.

Nel frattempo, una delle sostanze luminescenti, per esempio il rosso, viene applicata sulla faccia interna del cinescopio sotto forma di un sottile strato uniforme di emulsione. L'apparecchiatura di cui stiamo trattando comprende una potente sorgente luminosa puntiforme, posta nel punto preciso dove si produrrà la deviazione teorica quando il tubo sarà terminato (D' nella Fig. 30). Così la maschera svolge il suo compito per la prima volta, permettendo alla luce che attraversa i suoi fori di cadere esattamente sui punti dell'emulsione, che poi saranno colpiti dal pannello elettronico « rosso ».

In seguito a questa irradiazione, l'emulsione subisce una trasformazione fotochimica; con un trattamento successivo, che può essere confrontato allo sviluppo ed al fissaggio fotografici, l'emulsione viene disciolta ed eliminata nei punti che non sono stati colpiti dalla luce, in modo che rimangano solo i punti rossi in trama regolare sulla faccia anteriore del tubo. Questo trattamento viene ripetuto per i punti blu e verde, spostando ogni volta la lampada in corrispondenza dei rispettivi punti di deviazione ⁽¹⁾.

È così che i fori della maschera corrispondono infallibilmente alle terne luminescenti dello schermo. Essendo quest'ultimo curvo, deve essere curva anche la maschera, altrimenti la distanza fra i punti e il

⁽¹⁾ L'emulsione è applicata per centrifugazione. La faccia anteriore del cinescopio viene fatta ruotare velocemente in modo che l'emulsione si suddivida in strati uniformemente sottili sotto l'effetto della forza centrifuga. Occorre però notare che vi sono altri metodi di preparazione dello schermo.

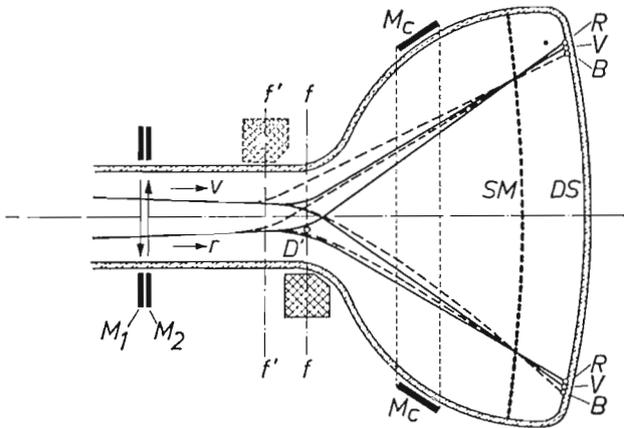


Figura 30. - Causa di errori di colore.

Metà superiore della figura: il giogo di deflessione è spostato rispetto alla corretta distanza $f-f'$ ad un punto $f'-f'$ verso dietro; il pennello elettronico r del rosso cade su un puntino verde; quello v del verde su un puntino blu. Metà inferiore della figura: campi magnetici esterni deviano i pennelli elettronici, che allora colpiscono punti erronei.

D' = punto di deflessione teoricamente corretto per il pennello del rosso; M_1 , M_2 = Magneti di correzione del colore; M_c = magneti di correzione per i campi magnetici esterni; per altri riferimenti vedasi la figura 29.

loro diametro dovrebbero diminuire avvicinandoci ai bordi dello schermo, ciò che darebbe luogo a un difetto visibile di uniformità.

È evidente che i fori della maschera possono essere convenientemente allineati con i punti solo se i punti di deviazione dei tre pennelli elettronici corrispondono esattamente al luogo dove è stata posta la sorgente luminosa utilizzata per la fabbricazione dello schermo, ossia nel piano $f-f$ della Fig. 30.

La purezza dei colori è garantita soltanto se i tre pennelli elettronici convergono esattamente. Tuttavia ciò non vale se i luoghi dei punti di deviazione variano, per esempio in seguito ad un errato montaggio del sistema di deflessione; i punti di deviazione potrebbero allora trovarsi nel piano $f'-f'$ della Fig. 30 e gli angoli di incidenza dei pennelli sulla maschera sarebbero differenti.

Supponiamo, a scopo di discussione, che in seguito ad una cattiva regolazione il pennello del rosso segua la normale traiettoria del pennello del verde; la figura mostra che i colori sullo schermo sarebbero almeno scambiati. Naturalmente un tale caso estremo non potrà prodursi in pratica, ma questo esempio mostra che i più piccoli er-

rori, per esempio un pennello che colpisca anche una piccola parte di un altro punto, sarebbero immediatamente percepiti dall'occhio, soprattutto verso i bordi dello schermo. In questo caso i colori saturi come il rosso, il verde, il blu, perdono la loro saturazione, in altri termini essi non sono più puri.

Un allineamento errato del sistema di deviazione non è la sola causa possibile di alterazione dei colori. Anche i campi esterni, come il campo magnetico terrestre, possono produrre questo effetto con maggiore evidenza. Nella metà inferiore della Fig. 30 si suppone che un campo magnetico abbia una direzione perpendicolare al piano del disegno. In questo caso i pennelli elettronici seguono una traiettoria leggermente curva e raggiungono la maschera sotto un angolo non corretto. L'effetto è uguale a quello di una cattiva regolazione del sistema di deviazione, i pennelli elettronici cadono parzialmente oppure anche totalmente su punti vicini, ciò che influisce sulla purezza dei colori.

Per ciò che concerne il campo magnetico terrestre dobbiamo considerare che l'effetto è più o meno uniforme e che i tre pennelli elettronici cadono sotto la sua influenza quando escono dal loro catodo. Il rimedio consiste semplicemente nell'applicare un campo magnetico opposto immediatamente davanti ai cannoni elettronici, ciò che si ottiene mediante l'aiuto di due anelli diametralmente magnetizzati, posti fianco a fianco sul collo del cinescopio (M_1, M_2 , Fig. 30).

Il magnetismo terrestre o qualunque altro campo perturbatore può essere esattamente neutralizzato dal campo combinato dei due magneti anulari, facendoli ruotare sia insieme, sia l'uno rispetto all'altro. Gli stessi magneti possono anche servire a correggere l'alterazione dei colori dovuta al fatto che i pennelli elettronici potrebbero non passare esattamente al centro preciso del campo delle bobine di deviazione.

Si possono anche compensare i campi perturbatori sulla parte anteriore del tubo, mediante campi magnetici antagonisti. Si montano da 6 a 8 magneti regolabili sulla periferia dell'ampolla del cinescopio, regolando l'intensità e la direzione del campo (M_c in Fig. 30). Dopo aver convenientemente regolato i magneti di correzione della purezza dei colori sul collo del cinescopio, si regolano i magneti dell'ampolla fino ad eliminare le piccole imperfezioni residue verso i bordi dello schermo.

Per effetto della sensibilità estrema del cinescopio ai campi magnetici esterni, le ultime regolazioni di purezza dei colori nel ricevitore

possono farsi solo quando questo è nella sua installazione definitiva. Basta semplicemente ruotare il ricevitore verso un'altra direzione, o anche spostare oggetti ferrosi nelle sue vicinanze, perché si renda necessaria una nuova regolazione generale della purezza dei colori. Si noterà ugualmente che, se oggetti ferrosi nello stesso ricevitore, specialmente la maschera del cinescopio che è in acciaio speciale, subiscono accidentalmente l'azione di un campo magnetico, non vi è altro da fare che smagnetizzare tutto il ricevitore in un campo alternato sufficientemente potente.

Costruzione generale del cinescopio a maschera.

La fotografia riportata nel Capitolo IV rappresenta un cinescopio a tre cannoni avente gli elementi correttori di cui abbiamo già trattato, come il blocco di convergenza, il magnete di purezza dei colori e il magnete di spostamento del blu, riuniti in un blocco compatto fissato all'estremità del collo del cinescopio. Il blocco delle bobine di deflessione viene spinto contro l'ampolla. I magneti di correzione agenti sulla parte anteriore del tubo, necessari alla compensazione dei campi parassiti, non sono rappresentati in questa figura poiché essi non vengono fissati al tubo ma più spesso all'interno del ricevitore.

Fino a poco tempo addietro questo tipo di cinescopio esisteva solo con schermo rotondo di 43 cm di diametro; nello stesso tipo rotondo è stato possibile evitare le tensioni meccaniche fra la maschera e lo schermo, allo scopo di poter garantire così la purezza dei colori per un lungo periodo di funzionamento. Più recentemente è stato possibile realizzare tubi rettangolari di buona qualità con diagonale di schermo che va fino a 63 cm.

Fino a poco tempo addietro l'angolo di deviazione era di 70° in tutti i cinescopi a colori, poi si è andati a 90° ed oggi esistono già cinescopi a 110°. Come per la televisione a bianco e nero, per un certo tempo si sono impiegati cinescopi con ampolla metallica. Tuttavia il vantaggio che si aveva con questo tipo di costruzione, principalmente l'economia di peso, era annullato dagli inconvenienti, tra i quali principalmente il pericolo di magnetizzazione dell'ampolla di acciaio. È questa la ragione per cui gli attuali cinescopi sono totalmente in vetro.

Come per tutti i moderni tubi a raggi catodici, nei moderni cinescopi a colori si utilizza la messa a fuoco elettrostatica, con una tensione

continua di 4-5 kV. La tensione sullo schermo deve essere da 20 a 25 kV, con una corrente che raggiunge circa 1 mA per una luminanza normale, di modo che il generatore di EAT deve fornire da 20 a 25 W. Può forse essere utile ricordare al lettore che un generatore che abbia queste caratteristiche è veramente pericoloso.

Come nei televisori a bianco e nero, la EAT è ottenuta mediante la trasformazione in salita e il raddrizzamento degli impulsi di ritorno di riga, generalmente unita ad un circuito recuperatore a diodo. Notiamo che il sistema di collegare la EAT e la deflessione orizzontale nel trasformatore di uscita della base dei tempi ha conseguenze nocive; data la potenza relativamente elevata della EAT, variazioni della luminanza media dello schermo daranno luogo a notevoli variazioni del carico del trasformatore, associate a fluttuazioni della corrente media dello schermo. Quando la luminanza dello schermo aumenta, tutte le tensioni del trasformatore diminuiscono e, oltre all'ingrandimento dell'immagine (un abbassamento dell'EAT ha sull'ampiezza di deflessione un effetto maggiore di una riduzione della tensione di deflessione) sorgono immediatamente difetti di convergenza (sovrapposizione difettosa) poiché le forme d'onda paraboliche e a dente di sega hanno la loro origine nel trasformatore di uscita orizzontale.

La necessità di tenere costanti queste correnti in tutte le circostanze rende realmente indispensabile una stabilizzazione molto efficace della base dei tempi orizzontale e dell'EAT, ciò che comporta naturalmente anche una stabilizzazione spinta della tensione di alimentazione, soprattutto per ciò che concerne la deflessione (ivi compresa quella verticale).

In linea di principio, il giogo di deflessione è identico a quello che è utilizzato con i cinescopi a bianco e nero, ma esso deve essere studiato e realizzato con maggiore cura e precisione. Le più piccole irregolarità nell'esecuzione dell'avvolgimento, che tendono ad influire sull'omogeneità del campo di deflessione, danno luogo a difetti di convergenza che è difficile o anche impossibile correggere.

Ora resta solo da accennare alla modulazione dei tre fasci elettronici mediante i loro rispettivi segnali video. Come nei cinescopi a bianco e nero, i segnali possono essere applicati sia al catodo sia al cilindro di Wehnelt del cannone (g_1) mentre l'elettrodo non utilizzato serve allora a regolare il livello del nero mediante l'applicazione di una tensione continua variabile. Si deve tener presente che lo schermo di un cinescopio per televisione a colori non apparirà nero se qualcuno dei tre cannoni è regolato al suo punto di interdizione o al di sotto,

in assenza di segnale video; in linea generale le tensioni continue applicate ai tre cannoni non sono uguali.

Se per una ragione o per l'altra la luminosità iniziale (livello del nero) deve essere aumentata o diminuita, le intensità luminose delle tre sostanze luminescenti debbono variare nel rapporto di 30 : 59 : 11, se si vuole evitare un'alterazione dei colori.

Tenendo conto delle differenze di rendimento delle tre sostanze e del fatto che le caratteristiche dei tre cannoni non possono mai essere completamente uguali, ciò significa che le tre tensioni di polarizzazione sui cilindri di Wehnelt debbono essere variate insieme, secondo un certo rapporto che differisce da un cinescopio all'altro. Ciò vale anche per la corretta regolazione dei segnali video; come abbiamo già detto, quando l'immagine contiene del bianco, le ampiezze dei segnali video rosso, verde e blu debbono essere uguali lungo tutto il sistema di trasmissione. Solo sul cinescopio del ricevitore i tre segnali sono applicati in un rapporto che, tenendo conto dei rendimenti delle sostanze luminescenti e delle caratteristiche dei tre cannoni elettronici, fornisce intensità luminose sullo schermo nel rapporto di 30 : 59 : 11; questa regolazione ha luogo negli amplificatori video che precedono i cannoni elettronici nel ricevitore.

Vi è appena bisogno di sottolineare che tutte le precauzioni debbono essere prese per assicurare un'amplificazione costante dei segnali video, oltre all'ottima linearità, altrimenti si osserveranno gravi alterazioni dei colori. Il lettore ricorderà che la compensazione dei difetti di linearità nella caratteristica del cinescopio ha luogo nell'apparecchiatura da ripresa televisiva.

Il grande numero di inconvenienti e di cause possibili di sregolazione di cui abbiamo parlato potrebbe condurre il lettore a concludere che vi sono poche possibilità con un sistema di questo genere di ottenere buoni, o solo accettabili, risultati, ma le immagini nei televisori a colori ottenute finora hanno mostrato che un'opinione così pessimistica non è giustificata.

Nelle mani esperte, un buon ricevitore dà in realtà immagini della migliore qualità, che oltrepassano di gran lunga in splendore e in purezza di colori tutte le altre forme di riproduzione, ivi compresa la proiezione delle pellicole cinematografiche e delle diapositive a colori. È questa una ragione di più per lodare la perseveranza che ha vinto numerose difficoltà tecniche e che ha reso una realtà la televisione a colori. Se si considera che alcune condizioni erano quasi impossibili da realizzare, il cinescopio a maschera in particolare può essere con-

siderato come un successo straordinario dei metodi di applicazione elettronici e tecnici.

Sistema di proiezione televisiva a colori.

Avendo parlato così a lungo del cinescopio a maschera (diciamo fra l'altro che è attualmente il solo cinescopio a colori utilizzato per applicazioni di carattere non sperimentale) non ci dilungheremo sulle esperienze precedenti o sugli sviluppi ancora in corso. È certo che il cinescopio a maschera non costituisce la soluzione finale; tuttavia non è ancora possibile prevedere la direzione nella quale sarà trovata questa soluzione.

Indipendentemente dal sistema molto complesso (simultaneo) che utilizza un unico cinescopio, esistono (e sono esistiti fin dalle prime esperienze di televisione a colori), sistemi che comprendono tre cinescopi a colori per proiettare le immagini dei tre colori primari su uno schermo comune, mediante un sistema ottico appropriato che permetta così di riprodurre le scene nei loro colori naturali. Un tale sistema sembrerebbe a prima vista il più semplice di tutti, ed è stato già descritto in precedenza. Però, riflettendo sul problema, ci si trova davanti a difficoltà che si oppongono a ulteriori sviluppi. A parte la luminosità relativamente bassa della proiezione mediante obiettivi, il problema principale è quello della distorsione trapezoidale provocata dall'incidenza obliqua dei fascetti luminosi e che a quell'epoca (verso il 1940) era insormontabile.

Successivamente è stata trovata la soluzione mediante l'utilizzazione di tre piccoli sistemi di Schmidt (specchi concavi) al posto degli obiettivi da proiezione; i pennelli luminosi del proiettore nei loro tre colori primari venivano deviati verso uno schermo traslucido mediante due specchi diecrici e davano così un'immagine a colori naturali (vedi Fig. 35). Questo sistema funzionava molto bene ed è anche oggi utilizzato, in una forma un po' modificata, in alcuni laboratori. La sola difficoltà degna di essere menzionata è che le deflessioni nei tre cinescopi da proiezione debbono essere rigorosamente regolate in modo che le trame siano identiche, altrimenti la sovrapposizione risulta difettosa, ciò che costituisce il problema più grave per tutti i sistemi simultanei.

La disposizione rappresentata nella Fig. 35, che utilizza cinescopi da proiezione da 6 cm, conviene per uno schermo da 53 cm di diagonale;

in questi ultimi anni è stata utilizzata con successo la disposizione di Fig. 36a su schermi che vanno fino a $4,8 \times 3,6$ m, con cinescopi da proiezione di 13 cm e sistemi di Schmidt proporzionalmente più grandi. Siccome non si utilizzano specchi dicroici, si ha un considerevole guadagno di intensità luminosa e di dettaglio. Allo scopo di avere una sovrapposizione esatta delle tre trame, i due cinescopi laterali debbono naturalmente essere leggermente ruotati verso il centro. Normalmente ciò dovrebbe provocare una distorsione trapezoidale (Fig. 36b), se non avvenisse il fatto che, per sopprimere gli specchi dicroici, si sono dovuti trovare accorgimenti per compensare questa distorsione trapezoidale sullo schermo, applicando una distorsione inversa ai campi. Sovrapponendo denti di sega molto stabili alle correnti normali di deflessione alle frequenze di riga e di quadro, si ottiene una perfetta compensazione di questo tipo. Insieme alla regolazione fine della linearità, alla sovrapposizione ed alla rotazione del campo, questa compensazione assicura una sovrapposizione estremamente precisa sia per quanto concerne le immagini sia per i colori.

Ciò che abbiamo detto a proposito del cinescopio a maschera si applica, forse con maggiore rigore, a questo sistema; l'immagine finale è di una brillantezza e di una purezza di colori che oltrepassano tutte quelle che si sono potute realizzare con i film e nella proiezione su grande schermo rappresenta una forma realmente impressionante di riproduzione.

Come abbiamo detto, questo metodo di presentazione è sempre più largamente usato nell'insegnamento, specialmente in chirurgia e nelle altre branche mediche dove il colore è così importante.

Indipendentemente dal sistema di Schmidt, la televisione a colori su grande schermo può anche essere ottenuta con il sistema di proiezione Eidophor, benché questo si serva del metodo sequenziale come del metodo simultaneo. Tuttavia tenendo conto del metodo molto complicato di trasformazione della modulazione del segnale video in modulazione dei pennelli luminosi, che comporta la focalizzazione dei pennelli elettronici, la deformazione dello strato di olio, la rifrazione nel punto di deformazione ed infine la distribuzione della luce mediante lo specchio lamellare, è molto difficile conservare la linearità fra le due modulazioni. Fra l'altro, vi è una tendenza a introdurre una decolorazione, oltre ad una saturazione alterata. Tuttavia l'enorme potenza luminosa della lampada allo xenon impiegata permetterà di utilizzare schermi di 8×6 m, sufficientemente grandi per sale da 1.500 spettatori.



CAPITOLO IV.

IL SISTEMA DI TRASMISSIONE



Abbiamo già detto che una delle condizioni fondamentali di tutto il sistema di trasmissione televisiva a colori è la compatibilità, cioè la possibilità per i ricevitori a bianco e nero esistenti di riprodurre, senza bisogno di alcuna modifica, i programmi a colore come se fossero programmi a bianco e nero; in altri termini il segnale a colori trasmesso deve contenere non solo le informazioni di ciascun colore rosso, verde e blu, ma anche le normali informazioni per le immagini a bianco e nero, secondo lo standard televisivo del sistema a bianco e nero per quanto concerne la sincronizzazione, gli spegnimenti, la polarità di modulazione, la larghezza di banda ecc. Il primo segnale, che contiene l'informazione a colori, è il segnale di *crominanza*, il secondo invece è chiamato segnale di *luminanza* ed abbreviato come segnale Y ⁽¹⁾.

Il segnale di luminanza Y .

Il primo problema che si presenta è di sapere come i segnali di colori primari possono trasformarsi in segnali a bianco e nero. La risposta sarà evidente se consideriamo per un istante il fatto che tutto ciò che ci circonda e che noi vediamo sempre a colori, è riconosciuto ed accettato da noi anche sotto forma di una buona riproduzione a bianco e nero.

⁽¹⁾ Y è quella, fra le coordinate X , Y e Z del sistema C.I.E. che, utilizzata da sola, dà la sensazione della luminanza di un colore (vedi cap. I).

La nostra esperienza prova che possiamo visualizzare la « informazione cromatica » semplicemente sulla base della « informazione di luminanza » contenuta nella immagine riprodotta. È una constatazione quotidiana che non occorre molta immaginazione per visualizzare un cielo blu o una erba verde. In realtà, la nostra attitudine a « vedere » a colori immagini a bianco e nero va oltre, poiché possiamo non solamente distinguere una mela verde da un frutto maturo, ma per esempio in una immagine a bianco e nero di un fascio di fiori diversamente colorati possiamo anche immaginare le tinte e le sfumature. La ragione è che le nostre facoltà visive attribuiscono a ciascuna gradazione di grigio, ossia a ciascuna gradazione di luminanza nell'immagine a bianco e nero, la tinta che ha la stessa luminanza nella curva di luminosità relativa.

È allora evidente che — e ciò costituisce una condizione essenziale per la riproduzione a bianco e nero di scene colorate — i diversi colori debbono essere rappresentati nei loro corretti valori di luminanza, in conformità con la curva di luminosità.

Ogni dilettante fotografo sa che un normale film a bianco e nero non riproduce fedelmente i valori dei colori, soprattutto in presenza del fondo blu del cielo. La curva di sensibilità dell'emulsione aumenta verso l'estremità blu e violetta dello spettro e anche nell'ultravioletto, ciò che dà luogo ad una riproduzione esagerata dei colori blu. Un cielo blu apparirà così come bianco. Le componenti blu della luce visibile possono essere attenuate, prima di raggiungere il film, ponendo un filtro giallo davanti l'obbiettivo, ciò che costituisce un importante miglioramento. Una riproduzione ideale a bianco e nero sarà ottenuta con un materiale sensibile la cui caratteristica spettrale sia sovrapponibile alla curva di luminosità relativa, ciò che è possibile ottenere con filtri.

Lo stesso principio si applica esattamente a tutti gli altri metodi di riproduzione, ivi compresa la televisione. Anche in questo caso i colori naturali, cioè quelli della scena ripresa, debbono essere resi in valori della scala di grigi corrispondenti ai valori cromatici della curva di luminosità. Così, per ritornare alla televisione a colori, se un segnale a bianco e nero (Y) deve essere prodotto partendo dai tre segnali di colori primari, ciò deve avvenire in conformità con le condizioni enunciate avanti.

La Fig. 12a mostra il modo con cui i colori di una scena sono suddivisi nei tre canali di crominanza, oltre alle componenti che le rappresentano nei tre segnali di colore primari. In questo senso, si no-

terà che la somma delle tre componenti deve in ogni istante essere uguale al valore corrispondente alla curva di luminosità relativa rispetto a questi colori. Mescolando semplicemente i segnali dei colori primari R , V e B , si ottiene un segnale composito che concorda esattamente con la curva di luminosità relativa; in altri termini ogni colore è rappresentato dal valore che corrisponde alla curva.

Non si deve però dimenticare che, per le ragioni che sono state esposte nel capitolo II, i segnali dei colori primari dei tubi da ripresa raggiungono un livello massimo comune (per il bianco) e che, per ripristinare il corretto bilanciamento, questi segnali debbono essere ridotti nel rapporto $0,30 : 0,59 : 0,11$ al ricevitore. Esattamente lo stesso avviene per il miscuglio dei tre segnali che formano il segnale Y ; essi vanno attenuati nel rapporto indicato e la formula per il segnale di luminanza può allora scriversi:

$$Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B$$

Questa riduzione e la somma successiva dei tre segnali primari R , V e B possono essere effettuati applicandoli a una matrice il cui schema è rappresentato nella Fig. 31. Tuttavia questo circuito, per quanto semplice possa essere, viene raramente impiegato in pratica poiché presenta molti inconvenienti. Più generalmente, si attenua anzitutto ciascuno dei segnali e successivamente i tre segnali attenuati vengono combinati mediante tre circuiti a tubi elettronici aventi una resistenza di carico comune.

Interlacciamento in frequenza.

Come abbiamo già notato, il segnale a colori emesso deve contenere non solamente il segnale Y (a bianco e nero) di cui abbiamo parlato, ma anche un altro segnale (il segnale di cromaticità) per la corretta informazione dei colori. Siccome le sensazioni dei colori dipendono generalmente da tre caratteristiche: la tinta, la saturazione e la luminanza, e quest'ultima è già espressa dal segnale Y , il segnale di cromaticità deve contenere informazioni sulle due altre caratteristiche, e cioè sulla tinta e sulla saturazione.

Ora è difficile combinare due tipi indipendenti di informazione in un segnale unico (per esempio un'onda portante a R.F.) in modo che essi possano essere resi disponibili al ricevitore, all'altra estremità della catena, (demodulati) separatamente e senza che reagiscano

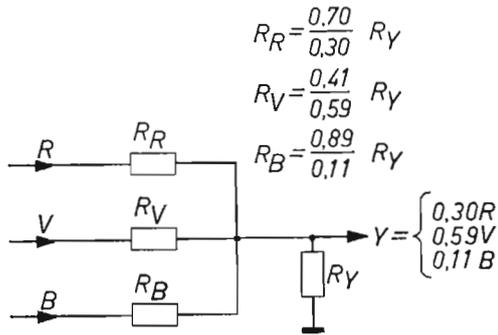


Figura 31. - Matrice resistiva per ricavare il segnale Y dai segnali R, V e B.

l'uno sull'altro. Il problema si complica ancor più per la necessità di introdurre questo segnale a R.F. in un canale normale di televisione, già totalmente occupato dal segnale Y dato che, per rispettare la compatibilità, questo segnale deve corrispondere ad un normale segnale a bianco e nero, ossia ad una portante video che è modulata con una larghezza di banda di 5 MHz⁽¹⁾. Tuttavia il problema può essere ingegnosamente risolto mediante l'interlacciamento in frequenza.

Lo spettro completo delle frequenze di un segnale televisivo è riprodotto dalla Fig. 32a (*f'*, tratto pieno). Senza fare appello alla matematica, si può dire che lo spettro è costituito anzitutto da armoniche della frequenza di riga, ossia:

$$\begin{aligned}
 1 \times 15.625 &= 15.625 \text{ Hz} \\
 2 \times 15.625 &= 31.250 \text{ Hz} \\
 3 \times 15.625 &= 46.875 \text{ Hz} \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 320 \times 15.625 &= 5 \text{ MHz} \\
 &\text{e così via.}
 \end{aligned}$$

A fianco di queste frequenze si trovano anche un gruppo di armoniche, quelle della frequenza di quadro di 50 Hz, che sono 25 Hz, 50 Hz, 75 Hz, 100 Hz, ecc.

⁽¹⁾ Ciò vale per lo standard a 625 righe. Nel seguito di questo libro considereremo unicamente tale standard, dato che esso è generalmente adottato come standard europeo a colori.

Dalla Fig. 32a si vede che la maggior parte della banda delle frequenze non è utilizzata e ciò suggerisce di occupare lo spazio disponibile con un altro segnale, in modo che i due segnali possano essere nuovamente separati in ricezione. Per esempio, gli intervalli possono essere occupati da un'altra serie di armoniche della frequenza di riga (f'' , linea tratteggiata). Ora se si considerano queste armoniche come frequenze laterali di un'altra portante, la frequenza di quest'ultima può essere stabilita in qualunque punto nella banda di 5 MHz, ma in ogni caso esattamente a metà strada fra due armoniche della frequenza di riga nella serie f' . Questa nuova portante contenuta entro la banda di 5 MHz è detta *sottoportante*.

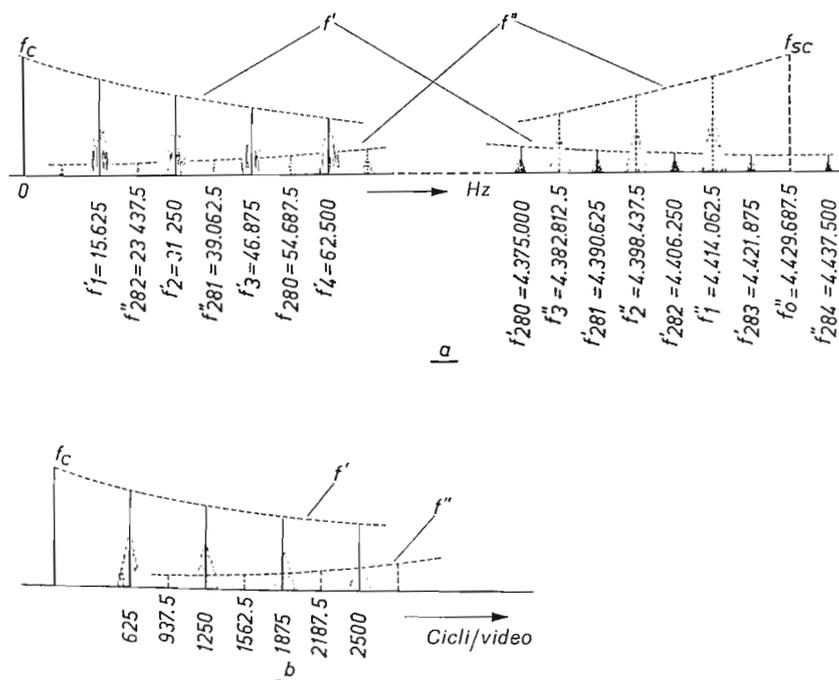


Figura 32. - Interlacciamento di frequenza, indicante:

- Portante principale f_c con le sue frequenze di banda laterale superiore f' e la sottoportante f_{sc} con la frequenza di banda laterale inferiore f'' ; siccome la sottoportante è 577 volte la metà della frequenza di riga, più alta della portante principale, si produce un salto di frequenze fra le serie di armoniche f' e f'' ; queste due serie di armoniche non si interferiscono fra loro.
- Dividendo per 25 la scala delle frequenze di a) si ha il numero di cicli per immagine. Ogni immagine della serie f'' di frequenze (modulazione della sottoportante) termina su un mezzo ciclo, di modo che le immagini successive sono in opposizione di fase.

Matematicamente, sappiamo che la frequenza di questa sottoportante deve essere un multiplo dispari della metà della frequenza di riga, come si vede immediatamente dalla Fig. 32a. Per ragioni che spiegheremo in seguito, la frequenza della sottoportante è piuttosto vicina al limite alto della banda di 5 MHz, ed è a 567 volte la metà della frequenza di riga, ossia 4.429.687,5 Hz o, arrotondando 4,43 MHz.

Questo sistema di interlacciamento in frequenza permette così la trasmissione di due indipendenti segnali televisivi modulati, in un unico canale; al fine di soddisfare l'esigenza della compatibilità, la normale portante video viene modulata dal segnale *Y* e la sottoportante dal segnale di crominanza.

Ci resta ora da spiegare il modo con cui possono essere separati i due segnali nel ricevitore. A parte uno stadio speciale di demodula-

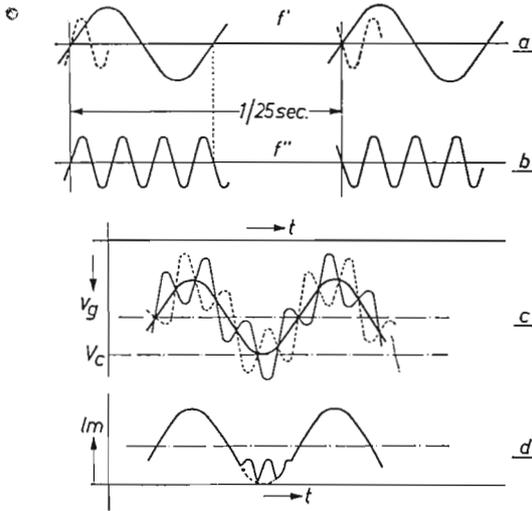


Figura 33. - Interlacciamento in frequenza.

- a) Una frequenza f' sinusoidale di modulazione della portante principale scelta a caso, in fase dopo ogni immagine.
- b) Una frequenza f'' sinusoidale di modulazione della sottoportante scelta a caso; la fase viene invertita dopo ogni immagine (linea tratteggiata a).
- c) Interferenza delle due frequenze di modulazione applicate alla griglia controllo del cinescopio a colori; linea intera = quadri pari; linea tratteggiata = quadri dispari; V_c = tensione di interdizione del cinescopio.
- d) Sensazione media di brillantezza corrispondente alla modulazione f' della portante principale; gli sfasamenti successivi della modulazione f'' della sottoportante sono troppo rapidi perché l'occhio possa percepirla; un tale reticolo diviene visibile solo quando si oltrepassa la tensione di interdizione del tubo.

zione della sottoportante, non è necessario immaginare mezzi particolari per raggiungere lo scopo, poiché si può ancora una volta basarsi sull'inerzia dell'occhio. Vediamo come avviene ciò, basandosi sulla Fig. 33.

Il lettore sa che un segnale di qualsiasi forma può essere considerato come costituito da un grande numero di armoniche di segnali sinusoidali puri sicché, benché la Fig. 33 rappresenti segnali sinusoidali, le conclusioni che possiamo trarre da questa figura, valide per tutti i segnali sinusoidali, lo sono ugualmente per tutto il segnale video.

L'oscillazione sinusoidale rappresentata in Fig. 33a è un'armonica della serie f' , cioè del segnale Y . Per tutte le frequenze di questa serie è possibile dire che esse riappariranno nella stessa fase al completamento di una scansione di immagine, cioè in $1/25$ di secondo, ammettendo che il contenuto dell'immagine non vari in maniera apprezzabile durante questo breve intervallo.

Una delle armoniche della serie f'' , cioè del segnale di crominanza, è rappresentata nella Fig. 33b; si vede che tutte le armoniche in questa serie riappariranno in opposizione di fase dopo una scansione completa e la ragione per cui ciò avviene risulta immediatamente evidente dalla Fig. 32b; se dividiamo per 25 la scala delle frequenze nella figura 32a, avremo invece di cicli al secondo (Hz), cicli per $1/25$ di secondo, ossia cicli per scansione di immagine (Fig. 32b). Mentre la serie f' è rappresentata da numeri interi

$$\begin{array}{ll} 1 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \\ 2 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \text{cicli per scansione,} \\ 3 \times 625 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{array}$$

la nuova serie f'' termina in ogni caso con mezzo periodo

$$\begin{array}{ll} 1 \times 625 + 312,5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \\ 2 \times 625 + 312,5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \text{cicli per scansione,} \\ 3 \times 625 + 312,5 \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots & \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \end{array}$$

Ciò significa semplicemente che tutte le frequenze f'' sono sfasate di mezzo periodo dopo ciascuna scansione completa, dunque esse sono in opposizione di fase.

Nella Fig. 33a questo sfasamento delle frequenze f'' è rappresentato con linea tratteggiata.

Quando la banda delle frequenze delle serie f' e f'' raggiunge finalmente il ricevitore e il cinescopio, la tensione di comando di quest'ultimo è in ogni istante uguale alla somma dei valori istantanei delle tensioni alle frequenze particolari, che nel nostro esempio, è la somma delle figure 33a e b. Siccome le tensioni alle frequenze f'' riappariranno in opposizione di fase dopo ogni ciclo di scansione, la tensione di comando per i quadri 1, 3, 5 ecc. differirà da quella dei quadri 2, 4, 6 ecc.: la Fig. 33 mostra queste due tensioni di comando che si alternano al ritmo di 1/25 di secondo (linea intera e linea tratteggiata). Sullo schermo del cinescopio a colori il risultato di una tensione di comando che si alterna a 25 Hz deve necessariamente essere che, sovrapposta sull'immagine costruita dalla frequenza f' (o più esattamente da tutte le frequenze della serie f'), sarà l'immagine formata dalla frequenza f'' (tutte le frequenze della serie f'') che si alterna di fase al ritmo di 25 Hz, apparendo così come immagine alternativamente positiva e negativa a questa frequenza. Notiamo tuttavia che l'occhio non può seguire una variazione così rapida ma ne percepisce solo la media, la quale in questo caso è identica all'immagine richiesta della serie f' delle frequenze (Fig. 33b).

Se la caratteristica del cinescopio (tensione di controllo in funzione della luminanza) fosse esattamente inversa della caratteristica di sensibilità dell'occhio alla luce (sensazione di brillantezza in funzione dell'intensità luminosa ⁽¹⁾) le frequenze f'' sarebbero allora completamente eliminate.

In realtà tuttavia a causa della notevole curvatura della caratteristica del cinescopio a colori, la compensazione per le trame in opposizione di fase è incompleta, specialmente se la tensione di controllo è alquanto inferiore al punto di interdizione del tubo (V_c della Fig. 33c). In questo caso si ha una perturbazione dell'immagine in zone particolari, sotto forma di un reticolo di righe molto fini, come mostrato con linea intera nella Fig. 33d.

⁽¹⁾ Con una certa approssimazione, questa curva è logaritmica, ciò che significa che raddoppiando l'intensità luminosa la sensazione di brillantezza subisce un aumento costante.

Questo segnale perturbatore sarà tanto meno avvertibile quanto minore è la sua ampiezza e quanto più fine è il reticolo, ossia alle frequenze più alte. Il migliore metodo consiste nel porre le frequenze f'' aventi la maggiore ampiezza nella zona superiore del canale televisivo di 5 MHz, ciò significa che se consideriamo le frequenze f'' come le bande laterali della sottoportante, quest'ultima deve anche trovarsi nella stessa zona.

Come abbiamo già detto, la frequenza della sottoportante è uguale a 567 volte la metà della frequenza di riga, ossia è circa 4,43 MHz. Esamineremo tra poco l'impossibilità di porre la sottoportante all'estremità della banda di 5 MHz.

Quando abbiamo considerato come impiegabili le frequenze f' e non le frequenze f'' , ciò era giustificato solo in parte dal fatto che le prime contengono i segnali di luminanza e le seconde il segnale di crominanza ma, così come il segnale di crominanza non deve interferire con il segnale di luminanza, quest'ultimo non deve interferire con il primo sull'immagine finale. Però non è difficile vedere che le stesse considerazioni valgono esattamente al secondo caso, alla stessa maniera che abbiamo visto per il primo. Basta semplicemente ricordare che le frequenze f' e f'' nelle Figg. 32 e 33 debbono essere considerate come aventi la loro origine nella demodulazione della portante video. Dal punto di vista della demodulazione della sottoportante, cioè di un demodulatore accordato sulla sottoportante e che non deve funzionare su una banda molto larga, la situazione è invertita: le frequenze f'' si succedono in fase dopo ogni scansione e le frequenze f' in opposizione di fase. Di conseguenza, in pratica, i ricevitori televisivi a colori sono dotati di due demodulatori in serie: il primo, che è accordato sulla portante video (o più correttamente sulla F.I. video) dà luogo al segnale Y oltre che al segnale di crominanza come è modulato sulla sottoportante, mentre il secondo, accordato sulla sottoportante, fornisce il segnale di crominanza. Si noterà tuttavia che per assicurare una maggiore riduzione dell'interferenza del segnale di crominanza sul segnale Y , il primo viene trasmesso senza la frequenza di sottoportante, ma solamente sotto forma delle sue frequenze laterali (in generale la frequenza della portante ha la maggiore ampiezza nello spettro delle frequenze emesse). Inoltre si inserisce nell'amplificatore Y del ricevitore un filtro a fianchi ripidi per la sottoportante e le sue frequenze laterali più basse (Fig. 34). Però, con questo filtro è difficile evitare sfasamenti nella piccola parte residua della banda fra 4,43 e 5 MHz.

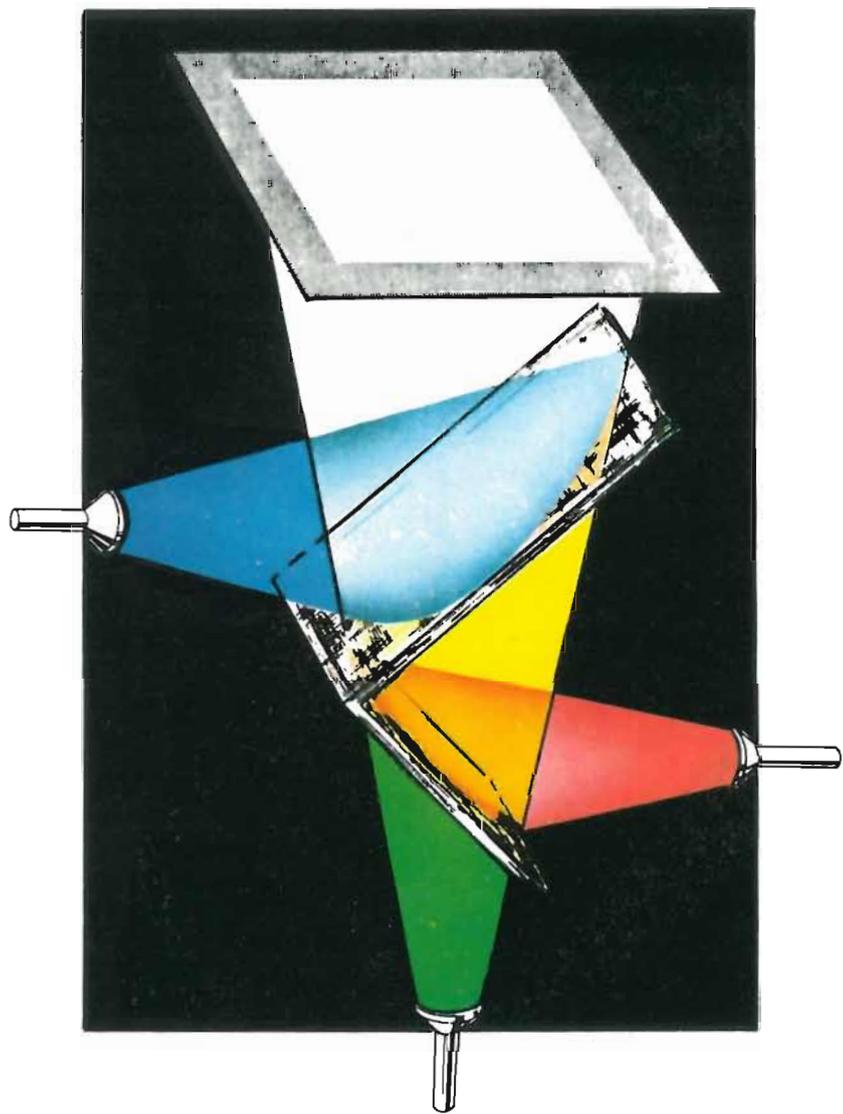


Figura 35. - Dettaglio di un sistema di televisione a colori a proiezione.

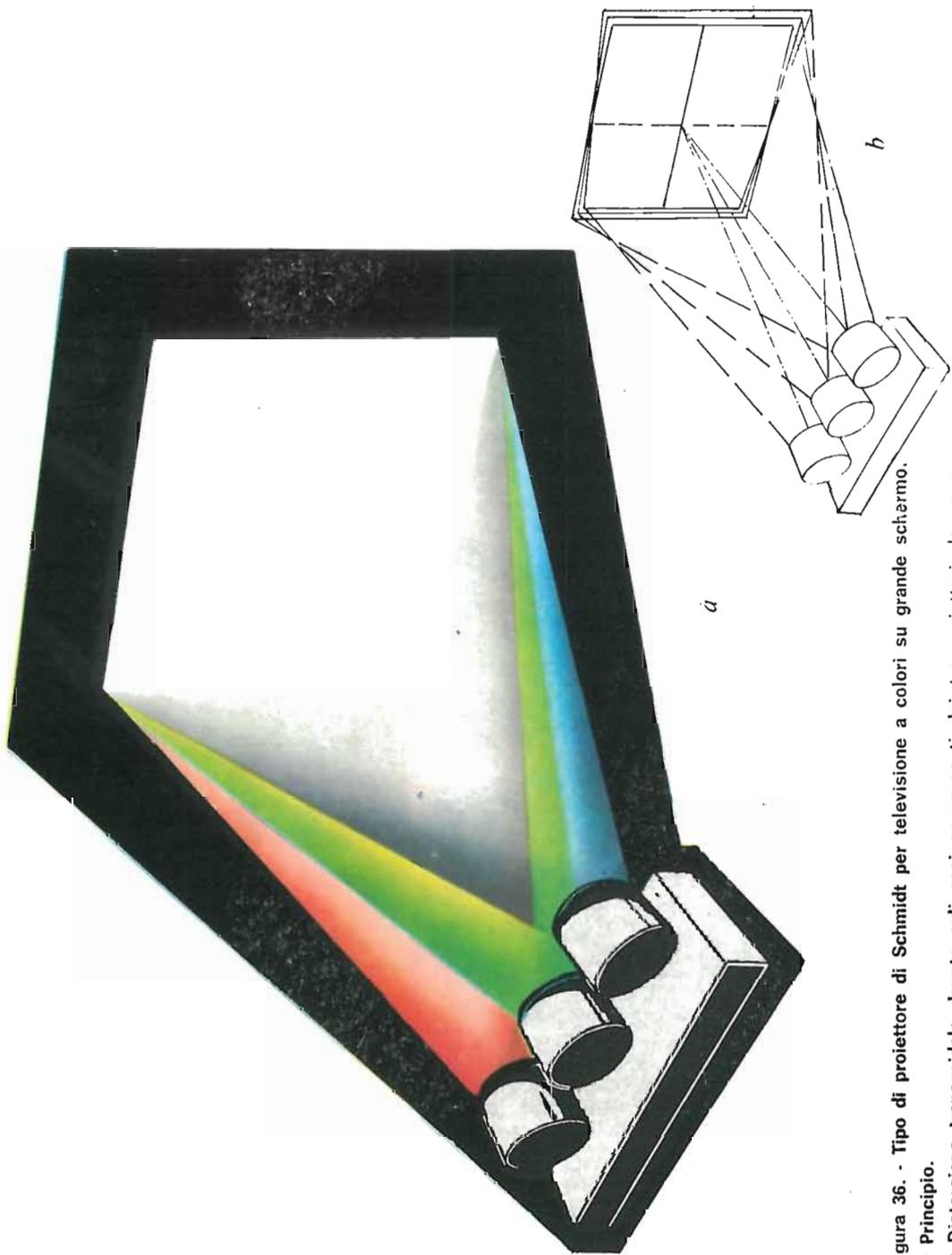


Figura 36. - Tipo di proiettore di Schmitt per televisione a colori su grande schermo.
a) Principio.
b) Distorsione trapezoidale dovuta agli assi convergenti dei tre proiettori; la correzione avviene elettricamente.

Il segnale di crominanza.

Un altro problema altrettanto difficile da risolvere quanto quello di sistemare il segnale di crominanza con il segnale Y in un solo canale televisivo, concerne il segnale di crominanza vero e proprio. Come abbiamo visto questo segnale deve contenere le due ultime caratteristiche della sensazione del colore, cioè la tinta e la saturazione.

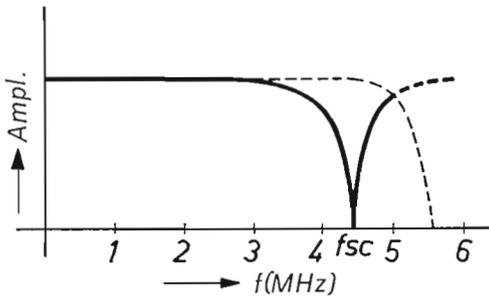


Figura 34. - Filtro attenuatore per la soppressione della sottoportante nell'amplificatore Y del ricevitore.

Abbiamo precedentemente detto che è disponibile una sola portante per questa doppia informazione, la sottoportante. Trascuriamo per ora di considerare la forma sotto la quale la tinta e la saturazione vengono espresse come informazione elettrica, ma esaminiamo anzitutto il metodo per introdurle in una portante unica. Siccome si tratta di due elementi indipendenti, la portante deve naturalmente avere due caratteristiche ugualmente indipendenti disponibili per la modulazione, ossia l'ampiezza e la frequenza. La modulazione di ampiezza non richiede alcun commento, ma nel caso della modulazione di frequenza si deve ricordare che ogni variazione di frequenza dovuta alla modulazione comporta automaticamente anche uno sfasamento definito. Di conseguenza, fino a un certo punto, la modulazione di frequenza può essere considerata simile ad una modulazione di fase; questa convenzione è particolarmente appropriata nel caso presente, poiché la modulazione della sottoportante diviene allora un problema molto più semplice, soprattutto a causa del fatto che una modulazione di frequenza effettiva non sarebbe neanche pratica, dato che l'interlacciamento in frequenza non deve risentirne.

In principio i due segnali di colore che debbono essere trasmessi possono, indipendentemente l'uno dall'altro, modulare la portante ausiliaria, per esempio la tinta con modulazione di fase e la saturazione con modulazione di ampiezza. Non è facile modulare a questo modo l'onda portante, ed è ancora più difficile demodulare le due modulazioni dell'onda portante nel ricevitore, ossia demodulare esattamente secondo la fase e l'ampiezza. Nella televisione a colori (sistema N.T.S.C.) si è scelta la tecnica seguente:

— con un oscillatore assolutamente stabile pilotato a quarzo si ottiene una frequenza di sottoportante di $4.429.687 \pm 12$ Hz. Una parte della tensione di uscita è applicata a una rete ritardatrice con uno sfasamento di 90° . Si hanno così due sottoportanti di uguale frequenza, ma aventi fasi differenti e si dice che le due onde sono in « quadratura » l'una rispetto all'altra. Per convenzione una viene chiamata « sottoportante I » (In fase) e l'altra « sottoportante Q » (Quadratura). Le due onde possono allora essere modulate in ampiezza, indipendentemente l'una dall'altra, in maniera solita. Benché per ora non sappiamo ancora completamente ciò che sarà modulato, parleremo dei due segnali di modulazione come segnale I e segnale Q .

Sin qui sappiamo soltanto che, sotto una forma qualsiasi, i due segnali debbono rappresentare la tinta e la saturazione.

Le due sottoportanti sono sovrapposte additivamente in uno stadio mescolatore, alla cui uscita si ha una sola sottoportante. La Fig. 37 mostra il metodo di combinazione delle due sottoportanti e si vede in (a) la situazione in assenza di modulazione (F_I e F_Q). Anche in questo caso si è usata la rappresentazione ben nota di un'onda sinusoidale mediante la rotazione di un vettore poiché, per facilitare le cose, nel seguito utilizzeremo solamente questi vettori per indicare le onde sinusoidali.

La Fig. 37b rappresenta quattro condizioni differenti di modulazione delle due sottoportanti F_I e F_Q ; in realtà le loro ampiezze variano a caso fra valori positivi e negativi mentre esse però si mantengono sempre sfasate di 90° fra loro. La direzione e la lunghezza di F_{sc} mostrano immediatamente l'ampiezza e la fase istantanea della sottoportante complessa risultante, evitando così la necessità di tracciare una sinusoide se solamente teniamo presente che ognuno dei sistemi rappresentati ha una velocità di rivoluzione uguale alla frequenza della sottoportante, in questo caso 4.429.687,5 Hz.

Si vede inoltre che l'ampiezza e la fase della sottoportante risultante dipendono senza alcuna possibilità di equivoco dalle ampiezze

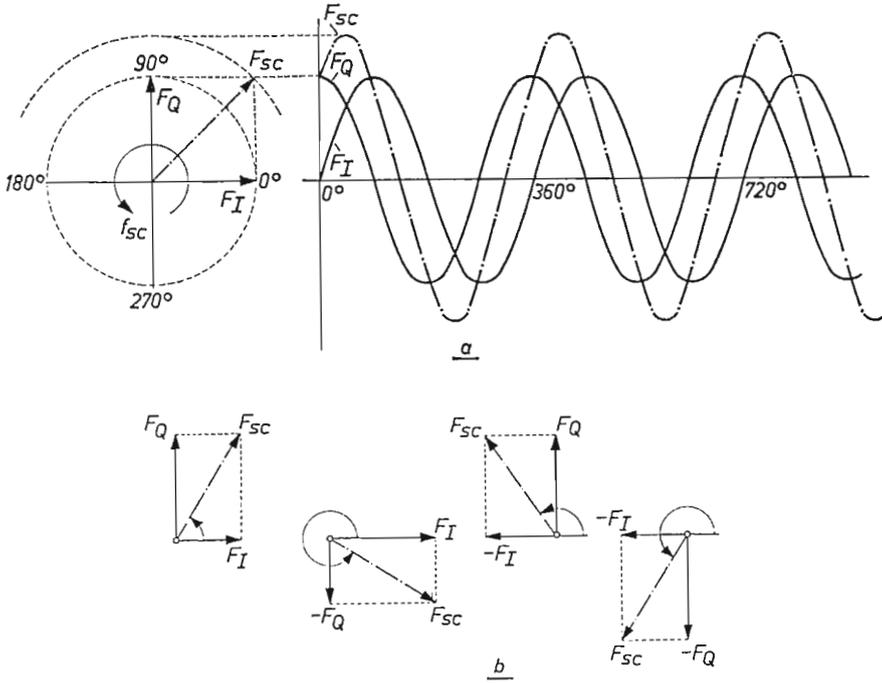


Figura 37. Miscuglio additivo di due sottoportanti di uguale frequenza ma in quadratura:
 a) Sottoportanti F_I e F_Q di uguale ampiezza e di frequenza f_{sc} sommate per produrre una sottoportante F_{sc} .
 b) Quattro esempi di addizione delle due sottoportanti aventi ampiezze e fasi differenti (+ o -).

delle sottoportanti F_I e F_Q ; in altri termini, partendo da una semplice modulazione di ampiezza delle due sottoportanti otteniamo una modulazione di ampiezza e di fase di una *sola* sottoportante e il segnale di crominanza desiderato diviene così disponibile.

Ora si può anche notare che la tinta viene trasmessa sulla fase della sottoportante, la quale può variare da 0 a 360°, mentre l'ampiezza trasmette la saturazione di questo colore. Un'ampiezza massima corrisponde dunque a una saturazione massima e l'assenza di ampiezza a nessuna sensazione di colore, cioè al bianco. Dobbiamo però evitare il possibile errore di interpretazione, per cui si potrebbe credere che i segnali I e Q stessi corrispondono rispettivamente alla tinta e alla saturazione; il contenuto reale di questi due segnali verrà trattato in seguito.

quenza di modulazione e di sottoportante) mentre i due segnali stessi vengono eliminati dal circuito bilanciato.

Così il segnale di crominanza risulta costituito in realtà soltanto dalle frequenze laterali inferiori e superiori, mentre la frequenza centrale della sottoportante è eliminata. Questo metodo non influisce in alcun modo sulle considerazioni teoriche svolte finora, purché si provveda, nel ricevitore, ad introdurre nel segnale di crominanza due frequenze sottoportanti, originate in un oscillatore locale, le quali per ciò che concerne la frequenza e più particolarmente il successivo sfasamento di 90° , debbono corrispondere alle sottoportanti soppresse dagli

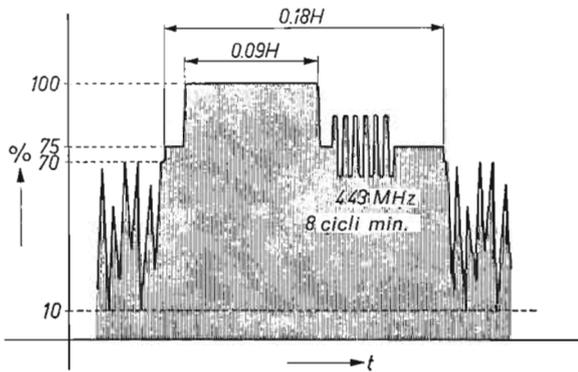


Figura 39. - Burst di sincronismo del colore inserito sul piedestallo posteriore dell'impulso di sincronismo di riga.

stadi modulatori bilanciati del trasmettitore. A questo scopo viene trasmesso un corto treno di onde di almeno 8 cicli (burst) alla fine di ogni riga o più precisamente nel piedestallo posteriore dell'impulso di sincronismo di riga (Fig. 39).

Questi brevi impulsi a frequenza della sottoportante si ripetono ad ogni riga, sicché con l'aggiunta di un conveniente circuito di riferimento di fase nel ricevitore, si può tenere l'oscillatore locale (le cui oscillazioni debbono essere più costanti possibili) non solamente sulla frequenza dell'oscillatore di sottoportante del trasmettitore ma anche sulla sua fase. Come vedremo in seguito, il più leggero sfasamento nella sottoportante del ricevitore provoca immediatamente una alterazione dei colori.

Demodulazione del segnale di cromaticità.

La sottoportante generata nel ricevitore, di cui abbiamo parlato nel precedente paragrafo, è utilizzata contemporaneamente per separare e demodulare le componenti I e Q del segnale di cromaticità; nella Fig. 40 è indicato uno schema semplificato a blocchi.

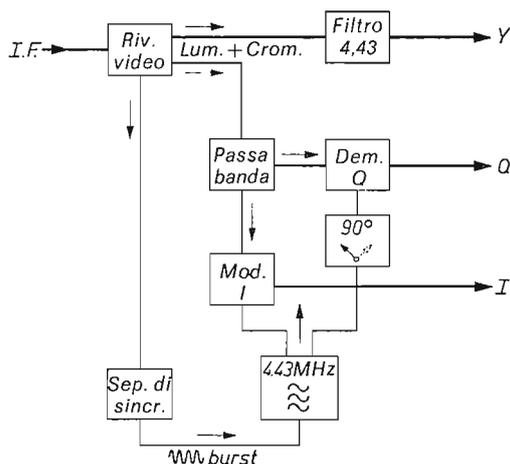


Figura 40. - Demodulazione del segnale completo a colori nel ricevitore per ricostituire i segnali Y , I e Q (vedi testo).

Il metodo usuale di rivelazione nella parte a F.I. del ricevitore, che è simile al sistema utilizzato nei ricevitori a bianco e nero, porta alla mescolazione del segnale Y con il segnale di cromaticità (segnale a colori composto). Questo segnale misto viene poi applicato direttamente alla matrice del cinescopio a colori e, tramite un filtro passa-banda, anche ai due demodulatori per i segnali I e Q . La banda passante del filtro è circa da 2,5 a 5 MHz ed elimina così tutte le interferenze sui segnali I e Q causate dalle forti frequenze laterali basse del segnale Y oppure dalla portante audio di 5,5 MHz. I due demodulatori sono del tipo sincrono, il cui principio è rappresentato nella Fig. 41. Come abbiamo detto, le onde portanti aventi una data ampiezza costante possono essere rappresentate da un vettore avente una certa lunghezza (modulo) che ruoti attorno alla sua origine con velocità corrispondente alla frequenza della portante (vedi Fig. 37). Una portante

modulata in ampiezza può essere rappresentata alla stessa maniera, se si tiene presente che la modulazione di ampiezza comporta la formazione delle bande laterali superiore e inferiore. Se chiamiamo f_c la frequenza portante e f_m la frequenza di modulazione, la frequenza laterale inferiore è $f' = f_c - f_m$ e la frequenza laterale superiore $f'' =$

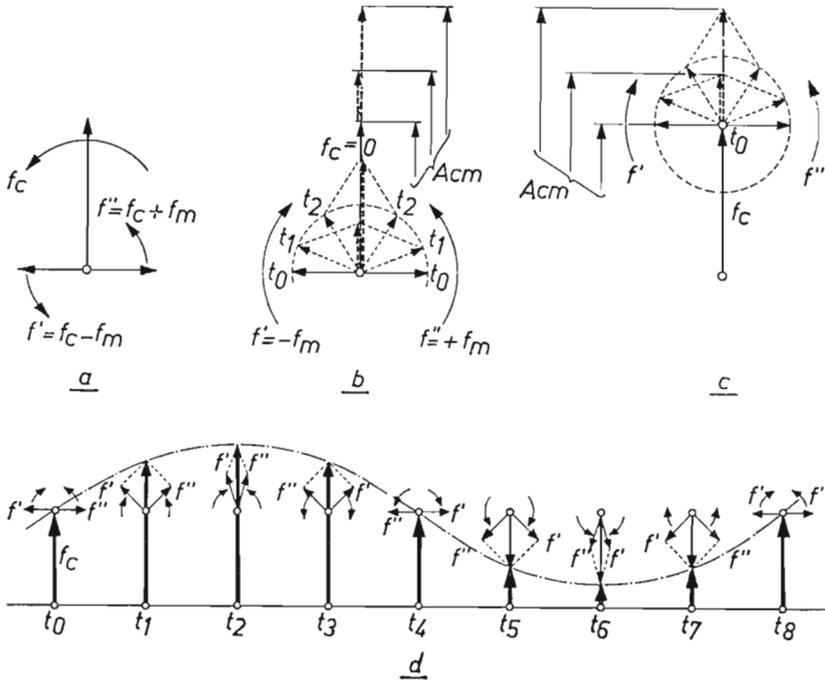


Figura 41. - Rappresentazione vettoriale della modulazione di ampiezza di una portante f_c con una frequenza di modulazione f_m :

- a) La frequenza è rappresentata con un vettore rotante con una velocità f_c ; la modulazione dà luogo ad una frequenza laterale superiore, vettore f'' con una velocità $f_c + f_m$ e ad una frequenza laterale inferiore, vettore f' , con una velocità $f_c - f_m$.
- b) Supponendo fisso il vettore della sottoportante f_c , i vettori f' e f'' ruotano con la stessa velocità f_m , il primo nel senso delle lancette dell'orologio e il secondo nel senso contrario; i due vettori si sommano geometricamente negli istanti t_0 , t_1 e t_2 e danno, insieme con l'ampiezza della sottoportante non modulata, il valore istantaneo A_{cm} della portante modulata.
- c) Ponendo i vettori f' e f'' all'estremità del vettore della portante f_c , il diagramma viene semplificato e risulta più facilmente interpretabile.
- d) Modulazione della portante per un ciclo completo della frequenza di modulazione, per otto istanti consecutivi; si vede chiaramente l'aumento e la diminuzione sinusoidale dell'ampiezza.

$= f_c + f_m$. Anche queste due onde possono essere rappresentate con un vettore, nel qual caso è evidente che tali vettori, insieme con quello della portante, debbono ruotare attorno a un punto comune (Fig. 41a).

Ognuno dei vettori ha una velocità angolare differente: quello della banda laterale inferiore è più lento e quello della superiore è più rapido dell'onda portante, a causa del fatto che le frequenze delle tre onde sono diverse. Frattanto se la differenza di velocità fra f' e f_c e fra f_c e f'' è la stessa, cioè è uguale a f_m , il vettore f_c può essere rappresentato come fisso e i vettori f' e f'' ruotanti con una velocità f_m . Ne segue che il vettore f' ruota nel senso delle lancette dell'orologio e f'' nel senso contrario (Fig. 41b). I due vettori delle onde laterali sono inoltre sempre simmetrici rispetto alla portante e ciò costituisce una condizione molto importante nella modulazione di ampiezza. La risultante, cioè la portante modulata in ampiezza f_{cm} , corrisponde alla somma geometrica del vettore f_c e dei valori istantanei associati ai vettori f' e f'' , come mostra la Fig. 41b per tre istanti differenti t_0 , t_1 e t_2 .

La costruzione della portante modulata in ampiezza f_{cm} può essere semplificata tracciando i due vettori non all'estremità ma facendoli ruotare attorno a f_c alla maniera indicata nella Fig. 41c. Generalmente viene usata questa convenzione per descrivere le condizioni relative alle onde modulate. Per chiarire questo punto, nella Fig. 41d sono rappresentati in successione i diagrammi per vari istanti, e in tale figura si riconosce facilmente la modulazione sinusoidale della portante. Nei diversi intervalli di tempo, è possibile qualunque numero di cicli della portante scelta ad arbitrio (numero di giri del vettore f_c).

Nella figura 42 è applicato lo stesso sistema di rappresentazione grafica alle due sottoportanti modulate, di cui è costituito il segnale di crominanza; la Fig. 42a rappresenta le due sottoportanti f_{cI} e f_{cQ} modulate rispettivamente con i segnali I e Q con uno sfasamento di 90° tra loro. La Fig. 42b mostra lo stesso segnale dopo la soppressione delle due onde portanti, ossia il segnale di crominanza come viene realmente trasmesso. Nella Fig. 42c viene illustrata la situazione rispetto alla demodulazione I nel ricevitore; in essa una nuova portante, in fase con la sottoportante I del trasmettitore, viene aggiunta al segnale di crominanza per generare una sottoportante normale modulata in ampiezza, dalla quale viene demodulato il segnale I alla maniera usuale.

L'iniezione della sottoportante e la successiva demodulazione possono essere eseguite alla maniera, grandemente semplificata, della Fig. 42d.

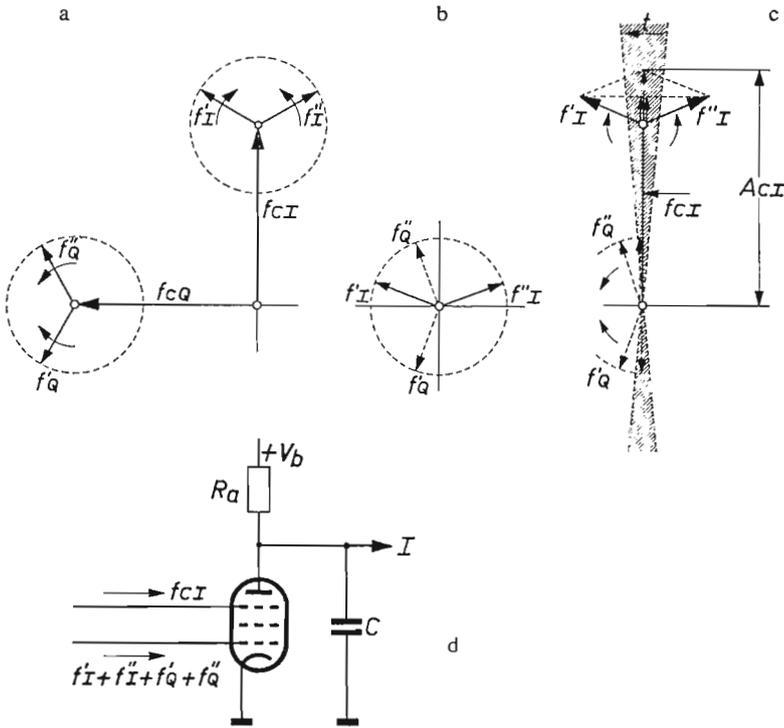


Figura 42. - Principio del demodulatore sincrono.

- a) Le due sottoportanti f_{cI} e f_{cQ} in quadratura e le loro frequenze f_I e f_Q prima della soppressione della sottoportante nel trasmettitore.
- b) Con la sottoportante soppressa rimangono solo le frequenze laterali inferiore e superiore f' e f'' delle frequenze di modulazione f_I e f_Q , le quali vengono trasmesse.
- c) Il demodulatore I nel ricevitore aggiunge la sottoportante f_{cm} al segnale ricevuto, in fase corretta e demodula solo durante il breve intervallo t ; in questo istante i valori istantanei di $f'_{Q'}$ e $f''_{Q''}$ sono sempre di segno opposto e si annullano fra loro, lasciando solo il segnale I demodulato con ampiezza A_{cI} .
- d) Schema del demodulatore sincrono utilizzando un pentodo.

Il segnale di crominanza, costituito dalle due bande laterali f_I e f_Q , viene applicato alla griglia controllo di un tubo multigriglia (esodo mescolatore) mentre la sottoportante I viene applicata alla griglia mescolatrice (g_3). Questo tubo funziona in maniera tale che può circolare corrente solo durante i brevi intervalli in cui la sottoportante è al suo valore massimo positivo (t nella Fig. 42c); il valore della corrente dipende dai valori istantanei delle quattro onde $f'_I, f''_I, f'_{Q'}, f''_{Q''}$.

Come mostra la figura, questi valori istantanei delle due onde di banda laterale I (proiezioni dei vettori sull'asse verticale) appaiono sempre nella stessa direzione e quelle delle due onde di banda laterale Q in senso contrario. Le due prime si sommano dando la modulazione I mentre le onde Q si annullano fra loro, e quindi non influiscono sugli impulsi di corrente che attraversano il tubo. Questi impulsi, che variano d'intensità con la modulazione I , danno luogo ai capi della resistenza R_a a proporzionali impulsi di tensione, filtrati alla maniera solita da un condensatore C , per dare il segnale puro I .

Alla stessa maniera con cui il segnale I viene demodulato dal segnale di crominanza mediante la sottoportante I , il segnale Q viene ottenuto da un secondo demodulatore sincrono funzionante in parallelo, al quale viene applicata la sottoportante Q con il suo sfasamento di 90° . Abbiamo così risolta l'ultima difficoltà nel sistema di trasmissione; i segnali Y , I e Q sono così riprodotti esattamente nel ricevitore, partendo dallo spettro complesso di una sola onda portante.

Abbiamo visto che il canale Y del ricevitore comprende un filtro a fianchi ripidi a 4,43 MHz per sopprimere la interferenza causata dalla forte ampiezza della sottoportante. Inoltre per evitare le perturbazioni dei segnali I e Q per effetto delle frequenze laterali inferiori del segnale Y , le bande laterali dei due segnali vengono limitate a 1,5 MHz per il segnale I e a 0,5 MHz per il segnale Q . Come vedremo fra poco non è necessario che le larghezze di banda del segnale Q siano maggiori. L'economia realizzata sul segnale Q è a vantaggio del più importante segnale I ed è questa la ragione della diversità dei limiti delle due bande.

Una analoga limitazione della larghezza di banda di questi due segnali viene effettuata nel trasmettitore prima della loro utilizzazione per la modulazione delle sottoportanti. Essa non dà luogo a conseguenze speciali, per quanto riguarda il segnale Q , poiché una banda di almeno 0,5 MHz è disponibile per le due bande laterali inferiore e superiore; comunque, la frequenza della sottoportante è di oltre 0,5 MHz inferiore al limite superiore del canale video di 5 MHz.

Delle bande laterali del segnale I , la cui larghezza di banda è di 1,5 MHz, la banda superiore viene trasmessa fortemente ristretta, considerando che la larghezza di banda del trasmettitore video è di 5 MHz. Invece la banda laterale inferiore viene trasmessa interamente, con una larghezza di 1,5 MHz (Fig. 43a). Segue chiaramente che la demodulazione del segnale I ristretto viene effettuata in realtà non in maniera esattamente rispondente a come abbiamo descritto, poiché alle fre-

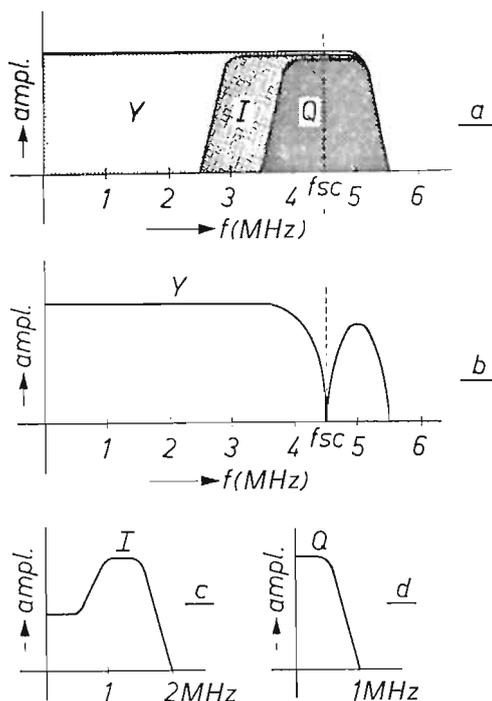


Figura 43. - Le diverse larghezze di banda per i segnali Y, I e Q.

- a) Al trasmettitore.
- b) Per il canale Y del ricevitore; filtro attenuatore per un'ulteriore soppressione della sottoportante e delle sue più basse frequenze di modulazione.
- c) Per il canale I del ricevitore; il guadagno si raddoppia fra 0,5 e 1 MHz poiché, data la limitazione nel trasmettitore per questa banda, la banda laterale superiore della sottoportante I scompare (vedi figura a); di conseguenza vi è solo la demodulazione a banda laterale unica a metà dell'ampiezza di uscita.
- d) Per il canale Q del ricevitore.

quenze più basse, fino a circa 0,5 MHz, il segnale demodulato appare approssimativamente due volte più potente che per le frequenze da 0,5 a 1,5 MHz; si compensa questo effetto adottando una opportuna curva di risposta per l'amplificatore che segue lo stadio demodulatore (Fig. 43b). Inoltre nel demodulatore Q le frequenze indesiderabili f'_i e f''_i comprese tra 0,5 e 1,5 MHz non possono annullarsi fra loro, dato che in questa zona esistono solo le frequenze f'_i . In questo caso la demodulazione del segnale Q è impura, ciò che costituisce una ragione sufficiente per limitare questo segnale ed una larghezza di banda di 0,5 MHz.

Ci resta ora da vedere come i segnali I e Q possono essere elaborati per trasmettere le caratteristiche di tinta e di saturazione.

I segnali I e Q .

Abbiamo già varie volte detto che i segnali I e Q debbono contenere le necessarie informazioni concernenti la tinta e la saturazione dei colori, ma non abbiamo ancora detto nulla sulla maniera con cui queste informazioni possono essere espresse in segnali elettrici. Esaminiamo ora questo problema.

Se ricordiamo la necessità essenziale di un sistema televisivo a colori, cioè la compatibilità, attribuito secondo il quale un ricevitore a bianco e nero riceve (naturalmente in bianco e nero) i segnali a colori trasmessi, vediamo che questa condizione viene soddisfatta quando viene trasmesso un segnale di luminanza (segnale Y) costituito, per un'ottima ricezione a bianco e nero, da una certa proporzione dei tre colori primari rosso, verde e blu, ossia da

$$Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B .$$

D'altra parte esiste anche una *compatibilità inversa* cioè l'attitudine di un ricevitore televisivo a colori a riprodurre immagini a bianco e nero senza alcuna particolare commutazione. Queste due caratteristiche sono illustrate schematicamente nella Fig. 44. La parte a si spiega da sola, ma per quanto concerne la parte b si deve notare che i guadagni relativi degli amplificatori del ricevitore di 0,30, 0,59 e 0,11 valgono solo quando i rendimenti delle tre sostanze luminose dello schermo sono uguali. Siccome ciò non avviene, i guadagni debbono essere adattati.

La caratteristica fondamentale nella Fig. 44b è che i tre amplificatori del ricevitore a colori vengono collegati in parallelo per la ricezione del segnale a bianco e nero. Di conseguenza, siccome il ricevitore deve ricevere ugualmente le trasmissioni in bianco e nero e quelle a colori senza alcuna commutazione, il metodo migliore nel caso di una trasmissione a colori consiste nell'applicare il segnale di luminanza Y ai tre amplificatori in parallelo.

Per dirigere le informazioni di colore ai tre canali di amplificazione insieme all'informazione di luminanza, ci si offre la possibilità illustrata nella Fig. 45a. In questa figura $(R-Y)$, $(V-Y)$ e $(B-Y)$ indicano sot-

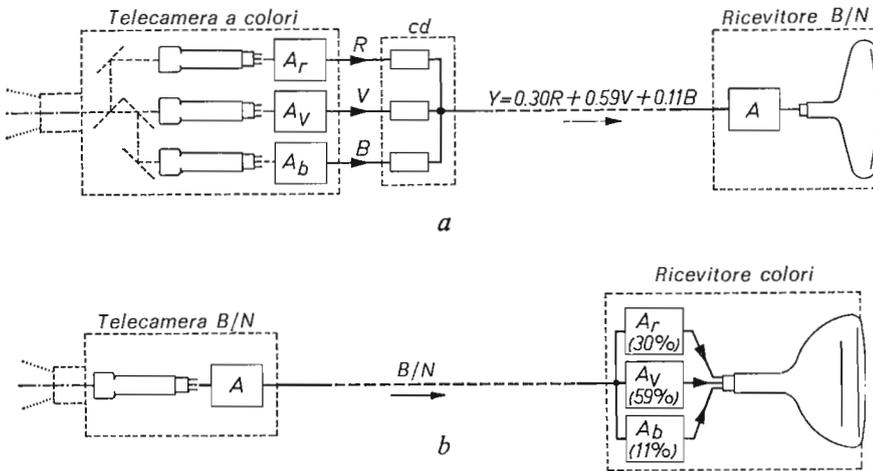


Figura 44. - Principio di compatibilità.

- a) I ricevitori a bianco e nero debbono poter ricevere in bianco e nero il segnale di un trasmettitore televisivo a colori; ciò richiede il segnale Y .
- b) La compatibilità inversa richiede che un ricevitore televisivo a colori possa anche ricevere in bianco e nero il segnale di un trasmettitore a bianco e nero; a tale scopo il segnale a bianco e nero viene diviso fra i tre canali elettronici secondo il rapporto 30 : 59 : 11.

A = amplificatore monocolore. A_r, A_v, A_b = amplificatori per i canali rosso, verde e blu. cd = matrice che sviluppa il segnale Y .

trazioni dei segnali elettrici e non valori cromatici. Tali sottrazioni possono essere fatte elettricamente molto semplicemente se ci si ricorda che, matematicamente, sottrarre equivale a sommare un valore negativo. Così per esempio $(R - Y) = R + (-Y)$, ciò significa che la polarità del segnale Y deve anzitutto essere invertita da un circuito a tubo elettronico per ottenere $-Y$. I segnali R e $-Y$ possono allora essere sommati in un circuito mescolatore classico contenente due tubi con resistenza anodica comune per avere così $R + (-Y) = (R - Y)$. Nella Fig. 45a, si suppone che i tre segnali di differenza $(R - Y)$, $(V - Y)$, $(B - Y)$ vengano prodotti nel trasmettitore, poi trasmessi in una maniera qualsiasi e infine demodulati e separati nel ricevitore. Questi segnali, mescolati con il segnale Y nella sua fase originaria (+), ricevuto su un'altra portante e convenientemente demodulato, debbono allora condurre ai segnali originali R, V, B , dato che $(R - Y) + Y = R$ ecc.

Tuttavia, uno svantaggio di questo metodo è che sono necessari nel ricevitore quattro segnali: $Y, (R - Y), (V - Y)$ e $(B - Y)$ mentre

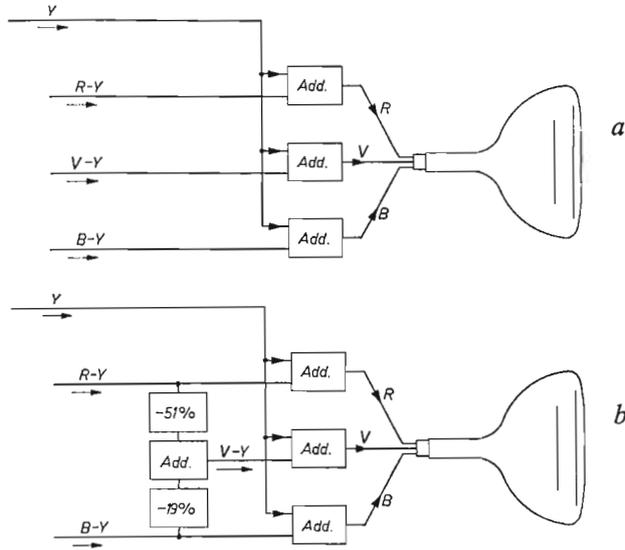


Figura 45.

- a) Metodo di generazione dei segnali R , V e B nel ricevitore mediante addizione del segnale Y ai segnali differenziali $(R - Y)$, $(V - Y)$ e $(B - Y)$.
- b) Il segnale $(V - Y)$ viene ottenuto mescolando il 51 % del segnale $(R - Y)$ con il 19 % del segnale $(B - Y)$ ed invertendo la polarità.

teoricamente dovrebbero essere sufficienti tre segnali, poiché ciascun colore è definito completamente solo da tre grandezze. Ma si può vedere che i quattro segnali non debbono essere considerati indipendenti fra loro; il segnale Y contiene già parti di R , V , B poiché

$$Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B .$$

Così se si sostituisce questo valore nei segnali di differenza, abbiamo

$$\begin{aligned} (R - Y) &= 0,70 R - 0,59 V - 0,11 B \\ (V - Y) &= - 0,30 R + 0,41 V - 0,11 B \\ (B - Y) &= - 0,30 R - 0,59 V + 0,89 B \end{aligned}$$

Per eliminare uno di questi segnali conviene esprimere, per esempio il segnale $(V - Y)$, in base ad uno degli altri, ossia

$$(V - Y) = - 0,51 (R - Y) - 0,19 (B - Y)$$

Questa sottrazione può essere anche effettuata molto semplicemente con mezzi elettrici. I segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ vengono anzitutto resi negativi mediante inversione della polarità e contemporaneamente vengono attenuati al 51 % e al 19 % prima di mescolarli in un normale circuito mescolatore. Sicché è necessario trasmettere solamente tre segnali Y , $(R-Y)$ e $(B-Y)$; il ricevitore ricostruisce allora il segnale $(V-Y)$ partendo da $(R-Y)$ e $(B-Y)$ con il metodo testé descritto e, mediante mescolazione con il segnale Y , ricostituisce i segnali R , V e B . Questo meccanismo è illustrato nella Fig. 45*b*.

Precedentemente abbiamo visto dettagliatamente che è possibile, mediante l'interlacciamento in frequenza della portante e delle sottoportanti, insieme con la doppia demodulazione di queste ultime, trasmettere indipendentemente tre segnali; il metodo più semplice consiste allora nel trasmettere i tre segnali che abbiamo chiamato Y , I e Q . Otteniamo:

$$\begin{aligned} Y &= 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B \\ I &= (R-Y) = 0,70 R - 0,59 V - 0,11 B \\ Q &= (B-Y) = -0,30 R - 0,59 V + 0,89 B \end{aligned}$$

Tuttavia, in pratica, questi segnali non vengono trasmessi, poiché essi non conducono alla qualità ottima di riproduzione. La ragione è la seguente.

Anzitutto dobbiamo ricordare al lettore che nella equazione precedente non si tratta di aggiungere o mescolare colori, ma segnali elettrici; il senso $+$ indica l'addizione, con la fase originaria, dei segnali, mentre il segno $-$ indica una inversione di polarità prima dell'addizione. Proviamo, mediante l'equazione, a determinare i segnali Y , I e Q per una serie di colori. Nella Fig. 46 è stato fatto ciò per i principali colori dello spettro solare, cominciando dal rosso. Il rosso, il verde e il blu sono considerati come primari (rispettivamente a circa 610, 535 e 470 nm), ossia colori per i quali i tubi da ripresa forniscono i loro segnali con l'intensità massima (= 1,00).

Il giallo, il blu-verde (ciano e turchese) e il magenta (i porpora) sono colori complementari di questi primari: il giallo (circa 572 nm) è complementare del blu, il blu-verde (circa 490 nm) è complementare del rosso e il magenta (circa - 535 nm) è complementare del verde. Il magenta non esiste nello spettro, ma si trova nella retta inferiore del diagramma di cromaticità (vedi Fig. 9). Il « colore » finale scelto nella Fig. 46 è il bianco, per il quale secondo le norme i tre tubi da ri-

presa debbono fornire segnali uguali di intensità massima ($= 1,00$). Tuttavia abbiamo già fatto notare che non è necessario che i tubi da ripresa forniscano una tale intensità; basta che i segnali ritrovino la stessa ampiezza nei primi stadi di amplificazione.

Se supponiamo che i colori indicati nella Fig. 46 sono forniti alla telecamera da un diagramma campione di colori, i segnali uscenti dai tre canali di amplificazione hanno la forma indicata nei diagrammi (R , V e B). Questi tre segnali di uscita, dopo aver attraversato la matrice e i circuiti di mescolazione di cui parleremo, producono i segnali rappresentati nelle figure successive: anzitutto il segnale Y , poi i segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$. Le due sottoportanti sfasate di 90° vengono modulate con gli ultimi due di questi segnali, per dar luogo a una sottoportante modulata in ampiezza e in fase.

Nella figura il diagramma vettoriale è indicato con carattere più grosso (freccie piccole); sotto di esso sono riportate le ampiezze della sottoportante corrispondente ai diversi colori. Per ottenere infine il segnale a colori completo utilizzato per modulare il trasmettitore si deve aggiungere il segnale di sottoportante al segnale Y , come mostra il diagramma inferiore dove sono indicate le ampiezze risultanti. Si vede che, in parte, queste ultime oltrepassano il valore normale di uno. Se pensiamo alla compatibilità, che significa che un ricevitore a bianco e nero deve dare una buona immagine utilizzando il segnale Y a cui esso è solo in grado di reagire, ciò anche significa che il segnale Y al suo valore massimo di $1,00$ deve modulare completamente la portante del trasmettitore. Però l'ampiezza eccessiva del segnale completo a colori sovramoderà gravemente il trasmettitore e ciò produrrà vari tipi di distorsioni e di interferenze negli amplificatori.

Nello stesso tempo si deve però ricordare che i rapporti di ampiezza indicati nella Fig. 46a si riferiscono a colori totalmente saturi o a colori spettrali quasi perfettamente puri, che si verificano molto raramente in pratica. I colori che siamo abituati a vedere attorno a noi sono generalmente molto meno saturi, essendo mescolati più o meno con il bianco. Di conseguenza se costruiamo diagrammi simili a quelli della Fig. 46a ma per colori non saturi, troveremo ampiezze molto più piccole, ciò che non sovramoderà sensibilmente la portante.

Anche così è necessaria una certa riduzione delle ampiezze massime, ciò che si ottiene attenuando i segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ prima di modulare con essi la sottoportante.

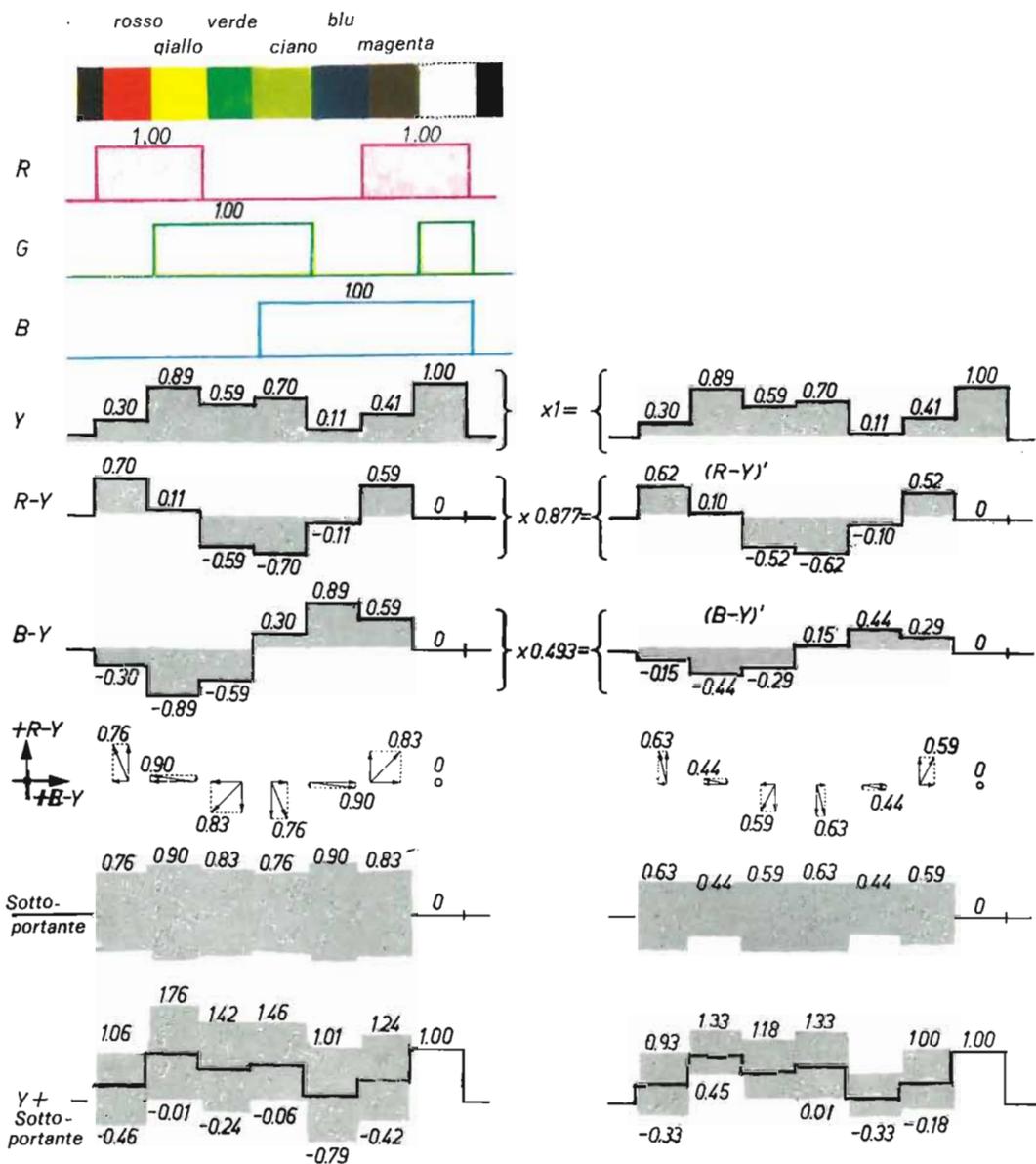
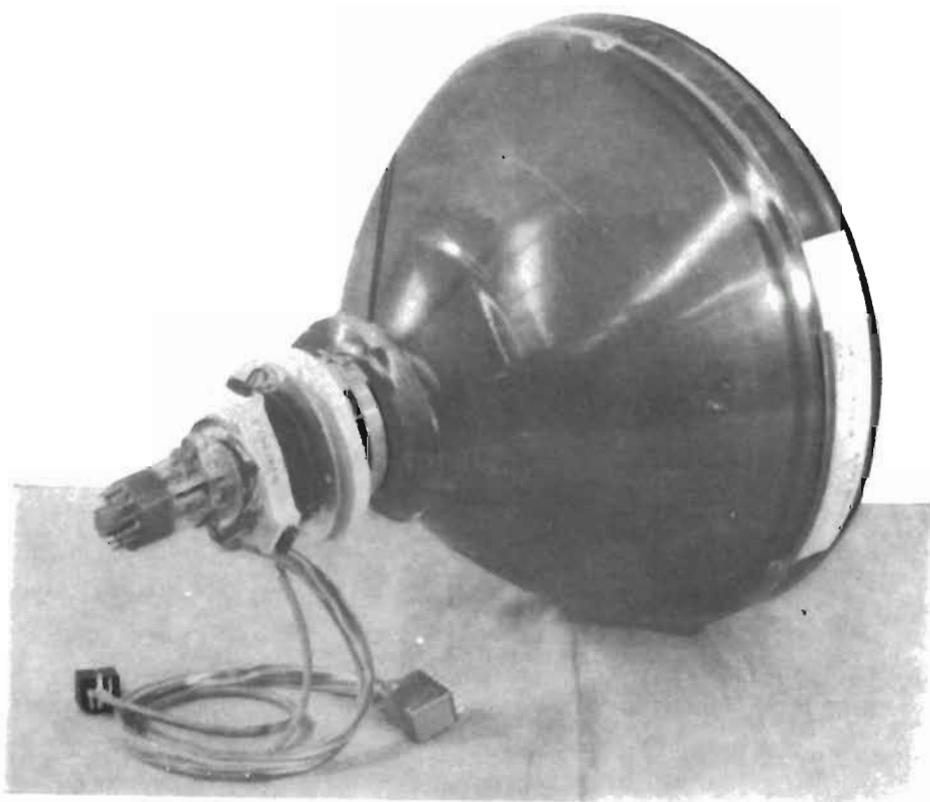


Figura 46. - Ampiezze dei segnali dei tubi da ripresa sulla portante video modulata nel trasmettitore, per sei differenti colori (vedi testo).

a) Senza riduzione dei segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$.

b) Con questi segnali attenuati per limitare al 133% la sovramodulazione del trasmettitore.



**Cinescopio a maschera con giogo di deflessione
e sistema di convergenza.**

L'esperienza indica che un sovraccarico sporadico della portante, che raggiunga circa il 33 %, è tollerabile, sicché il fattore di riduzione necessario per i segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ è stato scelto in modo che, in base ai colori spettrali puri di Fig. 46a, nel segnale video completo (il diagramma più in basso) non si oltrepassi un massimo di 1,33 volte l'ampiezza corrispondente al bianco e nero.

I fattori appropriati di riduzione risultano 0,887 per il segnale $(R-Y)$ e 0,493 per il segnale $(B-Y)$. Di conseguenza

$$\begin{aligned}(R-Y)' &= 0,877 (R-Y) = 0,62 R - 0,52 V - 0,10 B \\ (B-Y)' &= 0,493 (B-Y) = -0,15 R - 0,29 V + 0,44 B\end{aligned}$$

Questi segnali attenuati sono rappresentati nella Fig. 46b insieme con il diagramma vettoriale delle sottoportanti modulate con questi segnali, con l'ampiezza della sottoportante risultante ed anche con l'ampiezza totale del segnale a colori completo, costituito dal segnale Y (non ridotto) e dalla sottoportante. Come si può vedere sull'ultimo diagramma citato, non viene più oltrepassato il 133 % ammissibile rispetto all'ampiezza unitaria normale per il bianco e nero.

È inutile dire che questa riduzione nella modulazione $(R-Y)$ e $(B-Y)$ nel trasmettitore deve essere compensata, dopo la demodulazione dei due segnali nel ricevitore, mediante un'amplificazione supplementare, allo scopo di ripristinare l'equilibrio dei colori.

Il piccolo diagramma vettoriale della Fig. 46b, che mostra la somma delle due sottoportanti con il loro sfasamento di 90° per costruire la sottoportante composita, è stato ridisegnato su scala più grande e con maggiore dettaglio nella Fig. 47. Questa figura può essere facilmente spiegata riferendoci alla Fig. 37, che mostra la somma delle due sottoportanti in quadratura per quattro esempi; nella Fig. 47 una somma simile è effettuata in un punto per sei esempi, per i sei colori della Fig. 46 (senza il bianco). Mentre nella Fig. 37 le due sottoportanti sono indicate con F_I e F_Q , esse ora sono indicate con

$$(R-Y)' = [F_Q^*] \quad \text{e} \quad (B-Y)' = [F_I^*]$$

Notiamo ancora una volta che queste sottoportanti indicate con asterisco rappresentano la più semplice possibilità teorica. In realtà, come vedremo più avanti, si ha un certo sfasamento combinato delle due sottoportanti.

Le fasi dei colori.

Osservando la Fig. 47 si vede che la sottoportante composta F_{cs} assume una certa fase per ogni colore, tale che partendo dal rosso e continuando in senso inverso alle lancette dell'orologio, venga prodotta la totalità dello spettro solare nella sua sequenza naturale arancio, giallo, verde, fino al blu, oltre ai porpora che si trovano in basso nel diagramma di cromaticità. Si vede altrettanto chiaramente che le coppie dei colori complementari (rosso e blu-verde, verde e magenta,

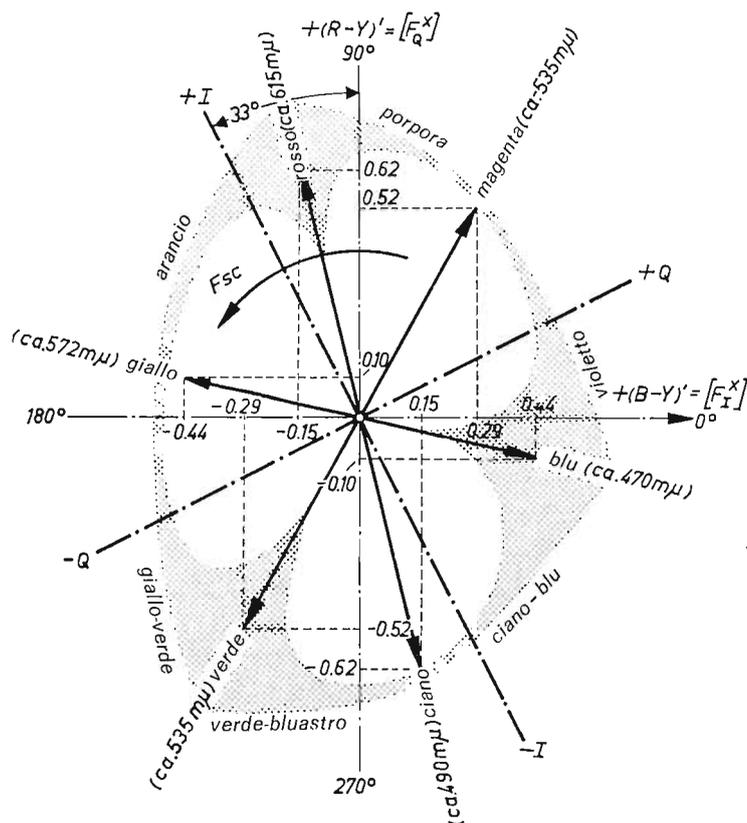


Figura 47. - Particolari ingranditi dei segnali $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ della Fig. 46b addizionati geometricamente per fornire la sottoportante per i sei colori della Fig. 46 (tratto pieno). L'involuppo triangolare curvo dimostra la relazione fra la fase della sottoportante e il colore associato nel diagramma di cromaticità (vedasi anche la Fig. 48). Gli assi $I-Q$ sono tracciati con grosse linee a tratto e punto. Con essi sono possibili migliori riproduzioni dei dettagli colorati rispetto agli assi $(R-Y)'$ / $(B-Y)'$, poiché l'asse I si trova nella zona arancio.

blu e giallo, ecc.) sono esattamente in opposizione di fase, così come sono opposti, da una parte e dall'altra del bianco, nel diagramma di cromaticità. Le ampiezze della sottoportante composita indicate nella Fig. 47 corrispondono in ogni caso alla massima saturazione del colore, come avviene anche nella Fig. 46. Per colori meno saturi, ossia mescolati con bianco, le ampiezze sono più piccole e la sottoportante scompare completamente per il bianco (vedi anche la Fig. 46). Come è stato detto nei paragrafi precedenti, la fase della sottoportante composita rappresenta la tinta, e l'ampiezza la saturazione.

Se nel diagramma di Fig. 47 ogni direzione (fase) corrisponde ad una certa tinta, le direzioni delle due sottoportanti (ipotetiche) F_1^* e F_2^* debbono corrispondere a colori propri. Questi possono essere calcolati mediante le equazioni per $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ e il sistema di coordinate sul quale è basato il diagramma di cromaticità. Il risultato è indicato nella Fig. 48. Le direzioni originarie delle sottoportanti, che erano perpendicolari fra loro, riappaiono ora come coordinate inclinate, con l'origine nel punto del bianco. Allo scopo di chiarire la relazione fra queste coordinate e quelle della Fig. 47, sono indicate anche le direzioni rispetto ai primari e ai loro colori complementari.

L'orientamento delle coordinate nel diagramma ha il seguente importante significato. Se i due segnali $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ fossero applicati sulle due sottoportanti, uno di essi conterrebbe le tinte indicate sull'asse $+(R-Y)' \dots -(R-Y)'$, ma vi sarebbero in realtà solo due tinte complementari: un porpora (circa -496 nm) e un blu-verde (circa 496 nm) con diversi gradi di saturazione, dalla saturazione massima al bianco. L'altra sottoportante $(B-Y)'$ conterrebbe solo la coppia di colori complementari giallo-verde (circa 570 nm) e violetto (circa $+570$ nm), egualmente in una gamma di saturazione che termina al bianco.

Come è stato detto, siccome le due sottoportanti modulate debbono essere trasmesse con larghezze di banda differenti, si deve determinare quale dei due segnali è conveniente trasmettere nella banda più piccola, ossia per quali dei colori citati una perdita di dettaglio risulta meno percepibile.

Uno studio approfondito di questo problema ha messo in luce alcuni fatti di grande interesse. Si è trovato per esempio che la percezione e la discriminazione dei colori da parte dell'occhio umano non sono affatto perfetti e non consentono di identificare senza equivoco i colori di dettagli molto fini; in altri termini, mentre le considerazioni che riguardano la sintesi dell'infinita varietà delle sensazioni dei colori me-

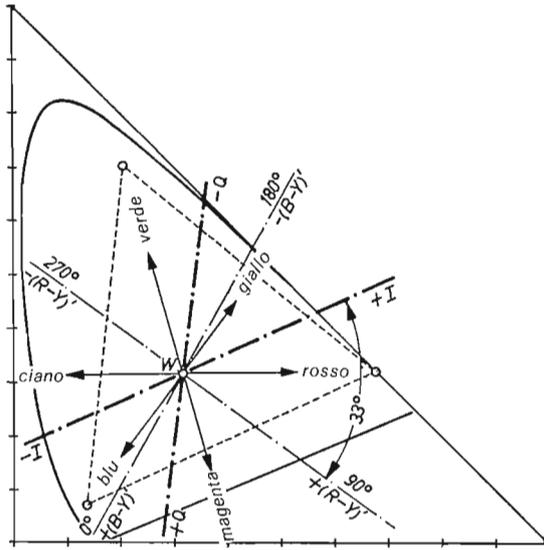


Figura 48. - Orientamento degli assi $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ e sottoportanti I e Q definitive nel diagramma di cromaticità.

dianete i tre primari valgono interamente su tutti gli oggetti colorati aventi superfici relativamente grandi, le leggi relative possono essere semplificate quando aumenta la finezza del dettaglio colorato osservato. Per esempio, nel caso di un dettaglio avente finezza tale che, secondo le convenzioni ammesse in televisione, esso corrisponda a 0,5 MHz o oltre, la nostra attitudine alla discriminazione dei colori risulta così ridotta, che le singole tinte fra le molteplicità di colori vengono percepite solo come colori arancio e verde-blu più o meno saturi o anche grigi più o meno densi.

Per i dettagli ancora più fini, corrispondenti ad esempio a frequenze di 1,5 MHz o oltre nel segnale video, l'occhio non è in grado di distinguere l'arancio dal blu-verde e vede solo un grigio, dato che viene percepita solo una certa luminanza ⁽¹⁾.

(1) Per evitare qualsiasi errore di comprensione si deve aggiungere che questa diminuzione di attitudine a distinguere i colori può essere considerata valida per dettagli colorati all'interno di una superficie più grande avente un colore differente. Quando diversi dettagli fini colorati costituiscono, messi insieme, una grande superficie sotto forma di un reticolo più o meno regolare, continuano a valere le leggi concernenti il miscuglio additivo dei colori.

Applicando questo fenomeno alla televisione a colori troviamo che:

- a) Le grandi superfici, ed anche i dettagli più importanti (frequenze inferiori a 0,5 MHz) debbono essere riprodotti nei colori veri, ossia debbono essere trasmessi i tre colori primari.
- b) I dettagli più fini (frequenze da 0,5 a 1,5 MHz) possono essere riprodotti secondo una delle due tinte, arancio o blu-verde di una certa saturazione, o anche come grigi.
- c) Non occorre assolutamente che i dettagli ancora più fini (frequenze superiori a 1,5 MHz) siano a colori; è sufficiente la trasmissione del segnale Y .

Della condizione a) suddetta si è già tenuto conto fissando la frequenza della sottoportante a oltre 0,5 MHz dal limite superiore della banda di frequenze disponibili per la trasmissione del segnale video. Come abbiamo visto le due sottoportanti possono pertanto essere modulate con due segnali per l'informazione di colore (segnali I e Q) fino a 0,5 MHz con bande laterali simmetriche, ciò che permette una precisa separazione fino a questa frequenza nel ricevitore. Si è così assicurata una trasmissione esatta dell'informazione di colori completa fino a 0,5 MHz.

Il punto b) suggerisce che basta una sola sottoportante modulata per i dettagli più fini (frequenze comprese fra 0,5 e 1,5 MHz). A causa del fatto che i colori per tali dettagli sono una coppia di colori complementari, cioè arancio e blu-verde, vi deve essere uno sfasamento di 180° fra le sottoportanti modulate per queste due tinte (vedi asse I della Fig. 47). Tuttavia questo sfasamento di 180° significa semplicemente un salto della fase di una delle sottoportanti; una seconda onda sarebbe non solamente inutile ma darebbe luogo ad un'interferenza.

Il fatto che sia necessaria una sola sottoportante (la sottoportante I) per le frequenze comprese tra 0,5 e 1,5 MHz è stato già preso in considerazione nella limitazione delle bande laterali dell'altra sottoportante Q . Basta infatti vedere che la sottoportante I è modulata con il segnale arancio/blu-verde e non dal segnale $(R-Y)$ o $(B-Y)$ poiché questi, come mostra la Fig. 47, corrispondono già rispettivamente alle coppie complementari porpora/blu-verde e violetto/giallo-verde.

Non si deve trascurare il fatto che, dopotutto, i segnali Y , $(R-Y)$ e $(B-Y)$ rappresentano solo una combinazione puramente matematica dei tre colori primari R , V e B di qualunque colore e che più o meno incidentalmente si ha che le combinazioni $(R-Y)$ e $(B-Y)$ corrispondono ai colori sulle rette rispettivamente porpora/blu-verde e violetto/giallo-verde. Frattanto, deve essere possibile con un metodo matematico qualsiasi trovare due nuove combinazioni di segnali

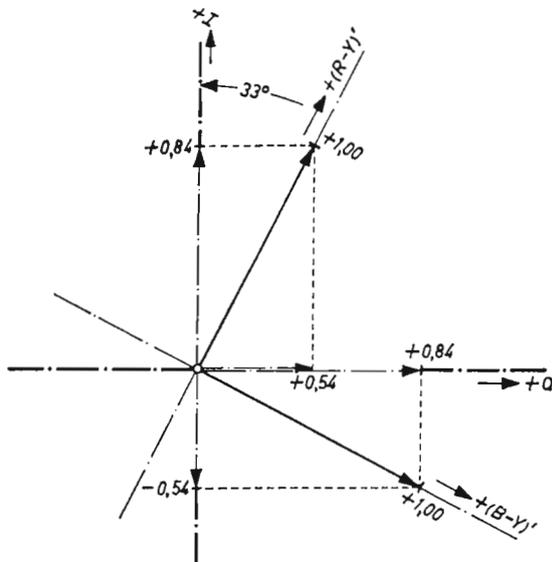


Figura 49. - Separazione dei segnali $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ nella direzione delle sottoportanti I e Q (vedasi testo).

che presentino anch'essi uno sfasamento di 90° nella Fig. 47, uno dei quali corrisponda alla retta arancio/blu-verde in questo diagramma (asse I tratteggiato). Questo è completamente ammissibile, purché le conseguenze vengano neutralizzate nel ricevitore.

L'angolo fra la retta arancio/blu-verde e l'asse $(R-Y)'$ è di 33° (Figg. 47, 48, 49). Secondo la Fig. 49 i due segnali $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ possono essere separati in due componenti, una nella direzione della retta arancio/blu-verde e l'altra normale a questa retta.

Chiamiamo la prima direzione come direzione I e la seconda come direzione Q . In questo caso la componente I per il segnale $(R-Y)'$ è uguale a

$$(R-Y)' \cos 33^\circ = 0,84 (R-Y)'$$

e la componente Q è uguale a

$$(R-Y)' \operatorname{sen} 33^\circ = 0,54 (R-Y)'$$

Per il segnale $(B-Y)'$ la componente I è

$$(B-Y)' (-\operatorname{sen} 33^\circ) = -0,54 (B-Y)'$$

e la componente Q è

$$(B-Y)' \operatorname{cos} 33^\circ = 0,84 (B-Y)'$$

Per trasformare le coordinate $(R-Y)'/(B-Y)'$ nelle coordinate I/Q si debbono sommare le componenti I e Q , ciò che fornisce

$$\begin{aligned} I &= 0,84 (R-Y)' - 0,54 (B-Y)' \\ Q &= 0,54 (R-Y)' + 0,84 (B-Y)' \end{aligned}$$

Se sostituiamo ora a $(R-Y)'$ e $(B-Y)'$ i valori delle componenti primarie R , V e B con cui siamo divenuti familiari, avremo

$$\begin{aligned} I &= 0,60 R - 0,28 V - 0,32 B \\ Q &= 0,21 R - 0,52 V + 0,31 B \end{aligned}$$

Con una matrice e semplici circuiti mescolatori possono essere prodotti questi due segnali I e Q partendo dai tre segnali primari. È sotto questa forma definitiva che le sottoportanti I e Q possono essere modulate per dare la migliore immagine possibile.

Come è stato già detto, la larghezza di banda della sottoportante I è di 1,5 MHz e quella della sottoportante Q è di 0,5 MHz. Il segnale I è esattamente sulla retta arancio/blu-verde del diagramma di cromaticità e il segnale Q sulla retta violetto/giallo-verde, altrimenti insignificante.

È evidente che la matrice del ricevitore deve poter ricostituire i segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ partendo rispettivamente dai segnali I e Q . Un semplice calcolo ci dà

$$\begin{aligned} (R-Y) &= 0,96 I + 0,62 Q \\ (B-Y) &= -1,10 I + 1,70 Q \end{aligned}$$

nelle quali è compresa la compensazione per l'attenuazione, al trasmettitore, secondo un fattore 0,877 per il segnale $(R-Y)$ e 0,493 per il segnale $(B-Y)$.

Un'inversione della polarità e una successiva addizione di questi segnali in una matrice portano al segnale $V-Y$:

$$(V-Y) = -0,51(R-Y) - 0,19(B-Y)$$

I segnali $(R-Y)$, $(B-Y)$ e $(V-Y)$ vengono infine combinati con il segnale Y in tre circuiti separati, per raggiungere i tre cannoni del cinescopio a colori.

Considerazioni finali.

Abbiamo così terminato l'esame dei principali problemi. Per concludere diremo alcune parole sugli aspetti più importanti del trasmettitore e del ricevitore, rappresentati rispettivamente, ridotti all'essenziale, dagli schemi a blocchi di Figg. 50 e 51. Siccome questi circuiti sono stati già trattati in dettaglio, questi schemi si spiegano da sé, ad eccezione forse delle linee di ritardo che seguono gli stadi di filtraggio. Ognuno di questi stadi dà un certo ritardo al segnale applicato e questo ritardo è tanto più grande quanto più stretta è la larghezza di banda del filtro. Il filtro a 0,5 MHz nel canale Q dà il ritardo più lungo (più di $1 \mu s$) e il filtro a 5 MHz nel canale Y dà il ritardo minore (appena $0,1 \mu s$). Queste differenze di tempo di transito sono compensate dalle linee di ritardo nei canali I e Q che ritardano il segnale Y

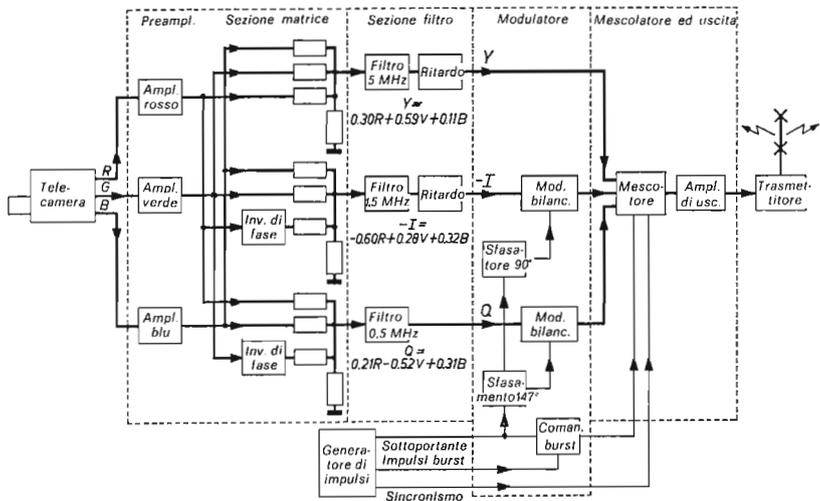


Figura 50. - Schema illustrante il tragitto del segnale nel trasmettitore.

di qualche decimo di microsecondo e il segnale Y di circa $1 \mu s$. Questa compensazione del tempo di transito è necessaria non tanto per evitare uno spostamento delle trame colorate ma per evitare un'alterazione dei colori sui contorni verticali dell'immagine; altrimenti durante queste transizioni da un colore all'altro i diversi circuiti mescolatori e della matrice darebbero luogo ad effetti totalmente incontrollabili.

Termineremo la nostra trattazione confrontando le Figg. 50 e 51 con la Fig. 11, allo scopo di mostrare come la trasmissione televisiva a colori per via radio è molto più complicata rispetto a quella a circuito chiuso. Si dà il nome di *codificatore* a quella parte dell'apparecchiatura che comprende i diversi circuiti di mescolazione e di matrice i quali debbono combinare i segnali R , V e B degli amplificatori correttori per formare i segnali Y , I e Q e successivamente convertire questi due ultimi segnali in una sottoportante composita modulata, per combinare infine questa con il segnale Y così da dare il segnale a colori completo; in realtà i segnali R , V e B sono trasposti in un codice, che viene decodificato nel ricevitore.

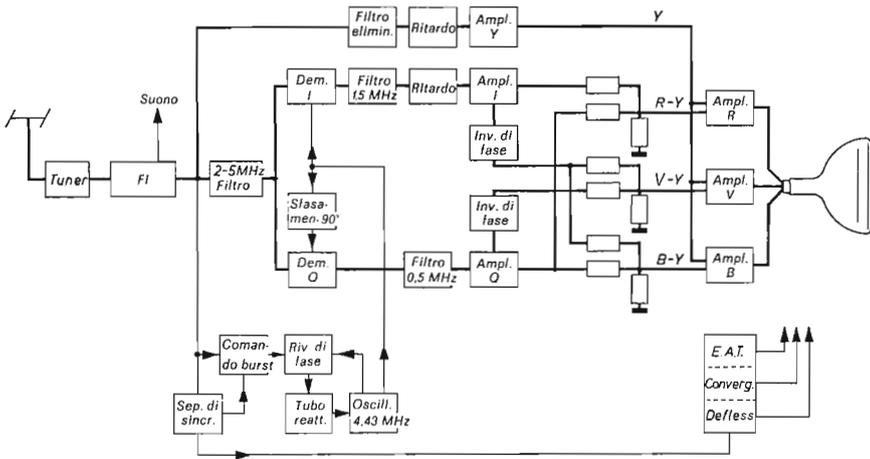


Figura 51. - Tragitto del segnale nel ricevitore.

Analogamente si chiama *decodificatore* la parte del ricevitore nella quale il segnale a colori composto, ottenuto in maniera usuale per rivelazione AM, ridà infine i segnali R , V e B . Si comprende che, oltre tutto, il codificatore e il decodificatore richiedono dal progettista non solamente una conoscenza molto approfondita della teoria, ma

anche molta esperienza pratica, per assicurare le necessarie stabilità e costanza di funzionamento oltre ad una bassa sensibilità alle interferenze.

Se si fa astrazione dall'ammirazione universale per l'ingegnosità che ha reso possibile un tale sistema di trasmissione, resta ancora l'amara considerazione che sono stati spesi tanti sforzi principalmente per trovare una soluzione a due problemi fondamentali, l'introduzione del segnale a colori nel canale televisivo disponibile e la necessaria compatibilità.

Si deve sperare che con l'ulteriore sviluppo della televisione a colori, l'industria sarà in grado di produrre televisori che combinino un prezzo ragionevole con una stabilità sufficiente, con l'impiego di dispositivi automatici che permettano di ottenere un'immagine di qualità sufficiente per un periodo di tempo molto lungo, nelle mani insperse del telespettatore medio.



IL SISTEMA SECAM



Come si è detto nella prefazione, sono stati compiuti molti tentativi per giungere ad un accordo internazionale su un unico standard per la televisione a colori europea, tentativi che purtroppo non hanno ottenuto i risultati auspicabili.

La soluzione più semplice sarebbe stata di adottare per l'Europa il sistema americano NTSC, modificandolo leggermente e tenendo conto del differente numero di righe. Tuttavia prima di prendere una tale decisione è stato compiuto un ampio studio ed una profonda analisi delle esperienze acquisite oltre Atlantico in oltre 15 anni, da quando cioè questo sistema è stato applicato. È praticamente certo che un tale studio avrebbe potuto condurre a un certo numero di suggerimenti di miglioramento, in particolare per ciò che concerne un sistema tecnicamente complicato come lo NTSC, i cui vantaggi e inconvenienti pratici non si erano potuti prevedere durante il suo sviluppo teorico.

L'esperienza ha mostrato che il sistema NTSC presenta una caratteristica principale, con alcuni effetti sfavorevoli, ossia la grande sensibilità agli errori di fase nella sottoportante che contiene l'informazione del colore. Tutti i trasmettitori e tutti i ripetitori debbono perciò essere dotati di costosi circuiti di correzione e di stabilizzazione di fase; i registratori dei segnali video su nastro magnetico debbono essere dotati di circuiti ausiliari estremamente precisi per mantenere costante la velocità di avanzamento del nastro (ciò che in pratica non si è avverato finora in maniera totalmente soddisfacente); infine, ciò che non è meno importante, i costruttori di televisori si trovano di fronte al difficile problema di produrre con un prezzo ragionevole ri-

cevitore aventi circuiti complicati e di alta qualità, che debbono rispondere alle esigenze molto severe di precisione e di stabilità e che debbono ugualmente essere più automatizzati possibile, allo scopo di dare ancora buoni risultati nelle mani dei profani. Non si deve dimenticare che questo ultimo punto, ossia il prezzo dei ricevitori, gioca un ruolo tutt'altro che trascurabile nella scelta del sistema di trasmissione per un impiego di massa, come è la televisione.

Anche se le condizioni precise di fase del sistema NTSC vengono soddisfatte in trasmissione e in ricezione, resta ancora un'altra sorgente di errori di fase nella sottoportante, praticamente al di fuori di ogni nostro controllo: il tragitto lungo il quale si propagano le onde radio tra l'antenna trasmittente e quella ricevente. A seguito di fenomeni di rifrazione e di riflessione in questo tragitto, si può difficilmente ritenere che ricevitori molto lontani dal trasmettitore ricevano una sola onda con un tempo di transito ben definito; più generalmente riceveranno un insieme di onde aventi tempi di transito leggermente diversi (e probabilmente variabili). Evidentemente questi diversi tempi di transito sono sinonimi di sfasamenti e, poiché essi variano generalmente con la lunghezza d'onda, le relazioni di fase nello spettro di banda laterale della sottoportante modulata possono risultare variabili in maniera imprevista.

Nel ricevitore NTSC la sottoportante modulata in quadratura viene demodulata con un demodulatore sincrono, il quale comporta la generazione nel ricevitore di un'oscillazione locale rigorosamente in fase con la sottoportante non modulata (nel codificatore del trasmettitore). Questa eguaglianza di fase viene ottenuta mediante un breve treno di onde (burst) trasmesso durante il piedestallo posteriore dell'impulso di sincronismo di riga, oltre che mediante circuiti comparatori di fase molto precisi nel ricevitore. Se non si bada all'economia nella realizzazione di questi circuiti, essi possono seguire esattamente tutte le imprevedibili variazioni della fase del segnale di burst ricevuto; essi restano tuttavia sensibili ai disturbi ed alle interferenze, di modo che nelle zone urbane dove vi sono molti disturbi ed a grande distanza dal trasmettitore non si può sempre essere sicuri che l'oscillatore locale del ricevitore resti in fase con la sottoportante ricevuta. Ciò provoca una difettosa demodulazione della sottoportante e di conseguenza un errato rapporto delle intensità dei segnali I e Q , con conseguente erronea riproduzione dei colori.

Verso la fine degli anni '50 (nel 1958) furono pubblicati in Francia da H. De France i particolari di un sistema di trasmissione basato

ripresa in segnali primari R , V e B . Dopo essere stati amplificati e corretti alla maniera solita, questi tre segnali sono applicati al codificatore SECAM, dove essi vengono trasformati mediante una matrice nel segnale di luminanza ($Y = 0,30 R + 0,59 V + 0,11 B$) e nei due segnali di colore ($R - Y$) e ($B - Y$). Mentre nel sistema NTSC questi due ultimi segnali sono trasformati in segnali I e Q , ciò non occorre nel sistema SECAM poiché i due segnali possono essere trasmessi con la stessa larghezza di banda (circa 1,5 MHz)⁽¹⁾.

I due segnali ($R - Y$) e ($B - Y$) giungono allo stadio modulatore del decodificatore tramite un commutatore elettronico (Fig. 52). A differenza del codificatore NTSC, il codificatore SECAM agisce solo su una sottoportante e di conseguenza occorre solo un modulatore (figura 52). Il commutatore elettronico è comandato dall'impulso di sincronismo di riga in maniera tale che i segnali ($R - Y$) e ($B - Y$) pervengono al modulatore a righe alternate, di modo che la sottoportante è modulata alternativamente da questi due segnali.

Il sistema SECAM utilizza la modulazione di frequenza, dato che in generale un'onda modulata in frequenza è meno sensibile ai transitori e ad altri tipi di interferenza rispetto ad un'onda modulata in ampiezza. Tuttavia le prove pratiche del sistema hanno mostrato che in realtà la modulazione di frequenza non è poi tanto superiore alla modulazione di ampiezza quanto si riteneva. La frequenza centrale della sottoportante è la stessa che nel sistema NTSC (valore suggerito per l'Europa 4.429.687,5 Hz), l'escursione di frequenza è di 750 kHz e le bande laterali sono limitate a circa 1,5 MHz. Siccome si ha una sola onda portante modulata in frequenza, non è necessario prevedere accorgimenti speciali in qualunque punto del percorso dell'onda per mantenere la costanza della fase ad un valore particolare. Come nel sistema NTSC, la sottoportante modulata viene combinata con il segnale di luminanza presente con tutta la larghezza di banda (circa 5 MHz) e dopo l'aggiunta degli impulsi di sincronismo e di burst, viene applicata come modulazione al trasmettitore a RF.

Nel sistema SECAM viene ugualmente trasmesso un segnale di burst, benché il ricevitore non abbia l'oscillatore locale, ma esso serve

⁽¹⁾ Essendo uguali le larghezze di banda, i tempi di transito dei due segnali nei corrispondenti amplificatori sono identici, ciò che toglie la necessità della linea di ritardo per il segnale I , che invece è usata nei codificatori e decodificatori NTSC.

come frequenza di riferimento ⁽¹⁾; in questo caso il burst gioca piuttosto il ruolo di segnale di riferimento per la sincronizzazione della fase del commutatore elettronico del decodificatore del ricevitore SECAM, la cui commutazione deve effettuarsi in fase con il corrispondente commutatore del trasmettitore, in modo che il segnale (R-Y) possa essere distinto dal segnale (B-Y). Questa sincronizzazione può essere semplicemente ottenuta trasmettendo un burst dopo ogni seconda riga, per esempio immediatamente prima del segnale (R-Y).

Il segnale trasmesso nel sistema SECAM è dunque costituito dal segnale di luminanza Y interlacciato come nel sistema NTSC con i segnali di cromaticanza (R-Y) e (B-Y); però questi due ultimi segnali sono trasmessi successivamente su righe alternate.

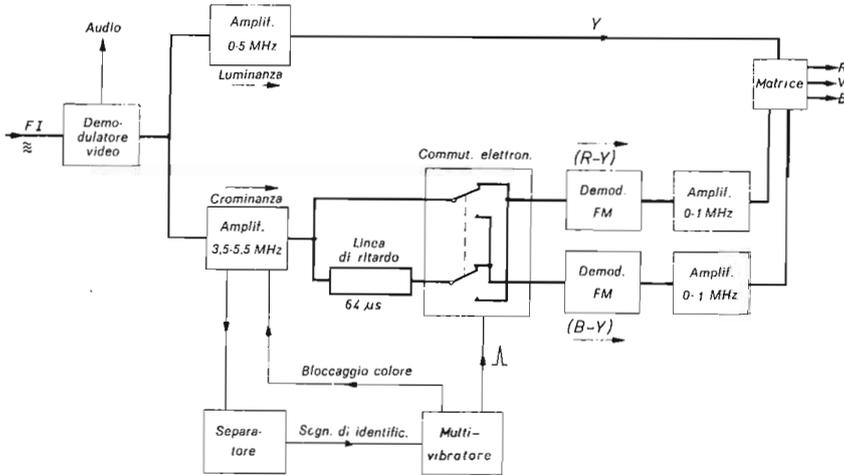


Figura 53. - Principio del decodificatore SECAM.

Nel ricevitore SECAM questi due segnali di colore sono ritrasformati in segnali simultanei alla seguente maniera (vedi Fig. 53).

Dopo la normale amplificazione a RF e FI, il segnale a colori composto demodolato nel rivelatore video del ricevitore viene applicato

⁽¹⁾ Nella sottoportante modulata in frequenza, la frequenza centrale è più o meno preservata, a seconda del grado di modulazione; nel sistema NTSC la frequenza della sottoportante viene completamente eliminata mediante l'impiego di circuiti modulatori bilanciati.

a due canali: da una parte il canale Y che è fondamentalmente lo stesso come nel ricevitore NTSC e, come nel sistema NTSC, va alla matrice e al cinescopio, e dall'altra parte il canale di cromaticità, il cui filtro passabanda di circa 3,5-5,5 MHz lascia passare principalmente la banda delle frequenze della sottoportante modulata in frequenza (frequenza centrale circa 4,43 MHz), ossia i segnali di colori sequenziali su righe alternate ($R-Y$) e ($B-Y$). Questo canale amplificatore è collegato da una parte direttamente e dall'altra parte tramite una linea di ritardo, ai due morsetti di un commutatore elettronico bipolare (Fig. 53). Questa linea di ritardo serve a ritardare il segnale che le è applicato di un tempo corrispondente esattamente a una riga, ossia per lo standard europeo a 625 righe, di circa 64 μ s.

È evidente che si debbono avere le esigenze più severe sulla costanza di questa linea di ritardo; se, per esempio, in seguito a variazioni di temperatura o per invecchiamento, il tempo di transito non corrisponde più esattamente al periodo di una riga, la finezza dei contorni verticali può essere danneggiata in maniera inaccettabile e si potrà avere una duplicazione dei contorni.

Nei primi tempi le linee di ritardo venivano realizzate con barrette oppure piastrine di quarzo, ma oggi esse sono costruite principalmente con barrette di vetro o di acciaio aventi una lunghezza molto precisa. Il loro principio di funzionamento si basa ancora su una combinazione dell'effetto piezoelettrico (conversione di tensioni alternate in vibrazioni meccaniche) e della propagazione di onde ultrasonore nel materiale di cui è fatto la linea di ritardo⁽¹⁾.

Dato che il segnale di cromaticità nel sistema SECAM è costituito da una serie sequenziale di segnali ($R-Y$) e ($B-Y$) a righe alternate, sarà sempre presente un segnale ($R-Y$) ed un segnale ($B-Y$) ai due morsetti del commutatore elettronico, e ciascun segnale si presenterà alternativamente all'uno e all'altro morsetto, dato che non proviene da una stessa riga ma da due righe successive. Risulta ora chiaro come il segnale di cromaticità sequenziale può essere convertito in un segnale simultaneo: se il commutatore elettronico bipolare è commutato alla fine di ciascuna riga si avrà sempre un segnale ($R-Y$) ad una

⁽¹⁾ Le barrette di vetro speciale fanno variare il tempo di transito di meno di 0,001 μ s (= 1 ns) quando la temperatura varia di circa 20 °C; però, tali barrette sono costose, ciò che è assai importante nell'industria dei ricevitori televisivi.

uscita ed un segnale $(B-Y)$ all'altra. Si vede ugualmente che il segnale di una data riga sarà sempre presente all'appropriata uscita durante due successivi periodi di riga, una volta attraverso il canale diretto e l'altra volta attraverso la linea di ritardo. L'informazione fornita dai segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ viene così perduta una riga sì e una no, di modo che la risoluzione del colore nel senso verticale viene ridotta a metà.

Come abbiamo già detto, questa perdita di definizione normalmente non è percepibile. Non si deve tuttavia trascurare il fatto che il sistema SECAM utilizza anche l'interlacciamento, ciò che conduce alla combinazione delle due coppie di righe interlacciate sullo schermo del cinescopio. Questo effetto sgradevole può essere osservato molto nettamente sui contorni vivi orizzontali o quasi orizzontali, soprattutto quando essi corrispondono ad una transizione tra colori complementari molto saturi.

Le due uscite del commutatore elettronico sono collegate ai canali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ del ricevitore. Questi due canali sono realizzati in maniera identica, e comprendono ciascuno un rivelatore per FM e stadi amplificatori appropriati e che pilotano la matrice che precede il cinescopio. Come nel sistema NTSC, queste matrici combinano i suddetti segnali con il segnale Y per dar luogo ai segnali primari R , V e B che comandano i tre cannoni elettronici del cinescopio.

La Fig. 53 mostra anche un altro canale (con linee sottili) che serve alla sincronizzazione di fase del commutatore elettronico ed al bloccaggio del canale di crominanza quando si riceve un segnale a bianco e nero (principio di compatibilità).

Mediante un impulso che proviene dalla base dei tempi, il segnale di identificazione è separato dal segnale di crominanza ed utilizzato per comandare un multivibratore monostabile. La tensione rettangolare di uscita di quest'ultimo comanda a sua volta il commutatore elettronico. Siccome il segnale di identificazione avviene solo dopo ogni seconda riga, per esempio sempre dopo il segnale $(B-Y)$, la sequenza di commutazione del commutatore elettronico rimane così inequivocabilmente determinata in modo che i segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ raggiungono sicuramente i corretti canali di amplificazione e matrici. Soltanto forti impulsi di disturbo sono in grado di perturbare lo scatto del multivibratore e dunque del commutatore, ciò che darebbe luogo ad una resa di colori difettosa.

In una versione modificata del sistema SECAM, viene trasmesso un breve segnale a dente di sega alla fine di ciascuna riga come segnale

di identificazione, invece di un burst. Se uno dei due segnali di colore [per esempio $(R-Y)$] è modulato e trasmesso con polarità inversa, il segnale a dente di sega dopo la demodulazione nel ricevitore avrà la polarità corretta solo quando il commutatore elettronico è correttamente sincronizzato. Altrimenti, ossia se il segnale a dente di sega non ha la polarità giusta, esso agisce come tensione di comando, ponendo il commutatore elettronico nella fase corretta.

Come avviene spesso nei processi di sviluppo tecnici, si è trovato in pratica che il sistema SECAM non aveva solo vantaggi rispetto al sistema NTSC, ma anche inconvenienti che sembravano trascurabili durante gli studi teorici.

Per esempio una proprietà sfavorevole del sistema SECAM è la presenza della sottoportante nel segnale ricevuto, con un'ampiezza che aumenta quando la saturazione del colore diminuisce e che diviene massima per il bianco. In particolare, quando un ricevitore a bianco e nero riceve un tale segnale, appare sullo schermo del cinescopio un reticolo molto fastidioso.

Nel sistema NTSC la sottoportante è completamente soppressa dal modulatore bilanciato e vengono solo trasmesse le frequenze laterali. La loro ampiezza diminuisce al diminuire della saturazione dei colori, in generale al 10 e 20 % dell'ampiezza massima e scompare completamente per il bianco. Questo effetto nocivo, nel sistema SECAM, può essere ridotto adottando come frequenza della sottoportante SECAM un multiplo dispari di metà della frequenza di riga.

Un altro miglioramento si ottiene aggiungendo un circuito filtro molto selettivo che sopprime, almeno in parte, la frequenza centrale e le bande laterali più basse della sottoportante FM. Naturalmente questa ulteriore attenuazione artificiale deve essere compensata con una appropriata amplificazione di queste frequenze nel ricevitore. Però ciò ha un effetto nocivo sul rapporto segnale/rumore; si è provato a migliorare questa situazione mediante una preaccentuazione molto spinta sulle più alte frequenze di modulazione, ma la risultante caratteristica di frequenza dei canali di amplificazione nel trasmettitore e nel ricevitore provoca una cattiva caratteristica ai transistori: si producono facilmente margini colorati e un'esaltazione dei contorni verticali, soprattutto al confine tra due colori fortemente saturi e ad alto contrasto.

Le difficoltà suddette possono essere superate con una modifica del sistema SECAM proposta dalla Telefunken (W. Brush), nella quale la modulazione di frequenza della sottoportante viene sostituita dalla modulazione in quadratura (AM) come nel sistema NTSC ma con l'al-

ternanza a sequenza di riga delle due componenti in quadratura. Non è allora più necessaria la demodulazione sincrona nel ricevitore, di modo che il sistema è esente da errori di fase come il sistema SECAM a FM. Però il ricevitore richiede un oscillatore locale come nel sistema NTSC; esso non deve necessariamente essere in fase con la sottoportante del trasmettitore, ma deve avere la stessa frequenza, sicché viene così perduta la semplicità originaria del sistema SECAM.

Nel sistema SECAM si ha una falsa riproduzione dei colori, in particolare dei colori debolmente saturi e del bianco, quando le frequenze di accordo dei due rivelatori a FM del decodificatore del ricevitore non corrispondono esattamente con la frequenza centrale della sottoportante trasmessa. Per risolvere questo problema si debbono adottare circuiti di controllo molto precisi e stabili oppure, se il segnale di identificazione è costituito da un corto treno d'onde alla frequenza della sottoportante, occorre disporre di un circuito comparatore di fase. Ognuna di queste soluzioni riduce ancora la semplicità del sistema SECAM originario.

Accurate prove pratiche del sistema SECAM sono state effettuate in questi ultimi anni in diversi paesi d'Europa. Si è concluso in generale che un buon ricevitore SECAM ha un prezzo di vendita non inferiore a quello di un ricevitore NTSC ma è più semplice da usare.

Nelle zone di buona ricezione i due sistemi possono dare risultati uguali; nelle zone dove la ricezione è meno buona gli inconvenienti che si manifestano possono orientare la scelta secondo i gusti personali, a seconda che si tolleri meglio l'alterazione crescente dei colori con il sistema NTSC oppure la sgradevole interferenza dei disturbi che si ha con il sistema SECAM.

Tuttavia il sistema SECAM presenta vantaggi molto forti per quanto concerne la registrazione magnetica dei programmi televisivi a colori. Attualmente la registrazione magnetica dei programmi televisivi a bianco e nero è largamente diffusa e si può prevedere che una importanza analoga avrà la registrazione nella televisione a colori. Con il sistema NTSC il registratore video deve contenere circuiti di controllo estremamente complicati, per mantenere costanti le velocità del nastro e delle testine oppure deve contenere linee di ritardo elettroniche regolabili, date le esigenze molto strette riguardanti la fase; finora nessuna di queste due soluzioni è risultata completamente soddisfacente.

Notiamo tuttavia che è precisamente in questo problema della re-

gistrazione dei programmi che troviamo il più grande inconveniente del sistema SECAM, cioè la difficoltà di trasformarlo nel sistema NTSC, ciò che è necessario in vista degli scambi di programmi tra l'Europa e gli Stati Uniti o il Giappone e gli altri paesi che adottano il sistema NTSC. Non deve dunque sorprendere che la commissione speciale della UER (Unione Europea di Radiodiffusione) non abbia potuto prendere una decisione formale per l'uno o per l'altro sistema.

Frattanto la situazione si è modificata in questi ultimi anni e non si tratta di scegliere fra questi due sistemi. È entrato in lizza un terzo sistema, il sistema PAL, proposto da W. Brush, Telefunken, e del quale trattiamo nella pagine che seguono.



IL SISTEMA PAL



Mentre il sistema SECAM può essere considerato come un tentativo di ridurre la complicazione tecnica del sistema NTSC, il sistema PAL (= phase alternating line) è un poco più complicato del sistema NTSC. Tuttavia questo nuovo procedimento è largamente indipendente dagli errori di fase, ed evita lo stadio intermedio della trasmissione sequenziale dei due segnali di colore, di modo che la finezza dei colori nel senso verticale è conservata quasi interamente; vedremo perchè non è conservata totalmente.

La nostra descrizione del sistema PAL deve partire dal fatto che lo spostamento dei colori nel sistema NTSC è dovuto agli errori differenziali di fase della sottoportante modulata ossia alle differenti rotazioni di fase delle singole frequenze dello spettro di frequenze costituito dalle bande laterali superiore e inferiore e dalla frequenza centrale della portante, trasmessa sotto forma di burst.

In condizioni sfavorevoli di trasmissione, lo sfasamento fra le frequenze laterali inferiori dei segnali I e Q , la frequenza del burst e le frequenze laterali superiori nel ricevitore può differire da quello del trasmettitore.

Siccome in generale gli spettri di banda laterale dei segnali I e Q contengono le stesse frequenze (ma non con le stesse ampiezze), si può supporre che gli errori di fase risultanti per questi segnali sono uguali, di modo che questi restano più o meno in quadratura. Ciò non è tuttavia esatto per la frequenza della sottoportante trasmessa come burst. Ne risulta in generale uno sfasamento di questa con i segnali I e Q nel ricevitore, sicché non si ha più un'esatta corrispondenza con la modulazione originaria nel codificatore. La figura 54 illustra questo fatto mediante diagrammi di fase; per semplicità, la fase del burst è indicata sempre verticalmente.

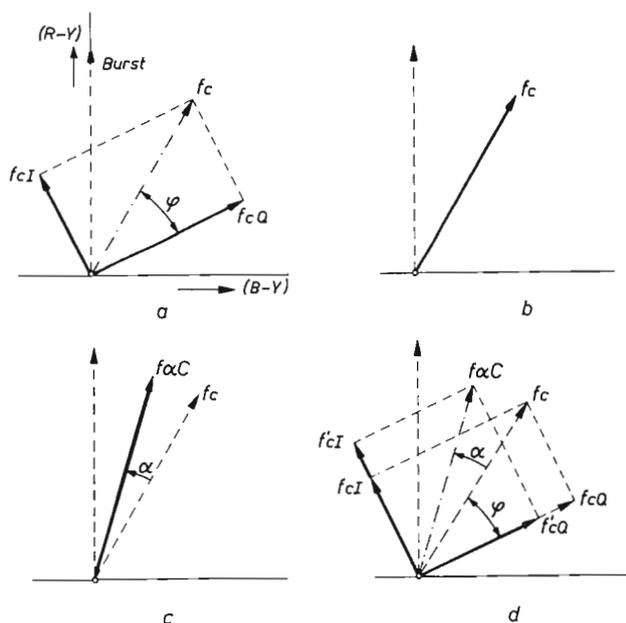


Figura 54. - Rapporti di fase fra la sottoportante di crominanza f_c e il burst quando si producono, durante la trasmissione, errori differenziali di fase. φ = angolo di fase fra la sottoportante e l'asse Q .

- a) Fasi corrette nel codificatore.
- b) Fasi corrette nell'antenna del trasmettitore.
- c) Situazione nell'antenna del ricevitore quando la sottoportante è ruotata di un angolo α (errore di fase).
- d) Nei demodulatori sincroni del decodificatore la sottoportante è demodulata secondo le componenti errate f_{cI}' e f_{cQ}' (f_{cI} e f_{cQ} = valori corretti).

La Fig. 54a mostra le relazioni di fase nel codificatore; ricordiamo al lettore che gli assi I/Q sono ruotati di 33° rispetto agli assi $(R-Y)/(B-Y)$ e quindi rispetto alla sottoportante (burst).

La Fig. 54b mostra la situazione all'antenna del trasmettitore dove troviamo, indipendentemente dai treni di onda emessi periodicamente come burst (linea tratteggiata), l'onda sottoportante modulata in ampiezza e in fase (l'onda portante principale non è stata rappresentata, dato che in questo caso particolare non ha importanza). Possiamo notare a questo proposito che il vettore F_c della Fig. 54b può essere considerato come la risultante di tutte le frequenze laterali I e Q e non come frequenza di sottoportante vera e propria, la quale è soppressa nel codificatore mediante i modulatori bilanciati.

Se queste frequenze laterali subiscono una rotazione di fase non uniforme durante la trasmissione, allora all'antenna del ricevitore la loro risultante sarà in posizione di fase erronea rispetto al burst (Fig. 54c). I demodulatori sincroni del ricevitore, che funzionano in fase con il burst, daranno allora luogo ad una coppia di componenti I/Q [a 33° e a $(33-90)^\circ$] con un errato rapporto di ampiezze (Fig. 54d).

Il sistema PAL utilizza l'artificio seguente per compensare l'errore di fase fra il burst e la sottoportante: il segnale di sottoportante da

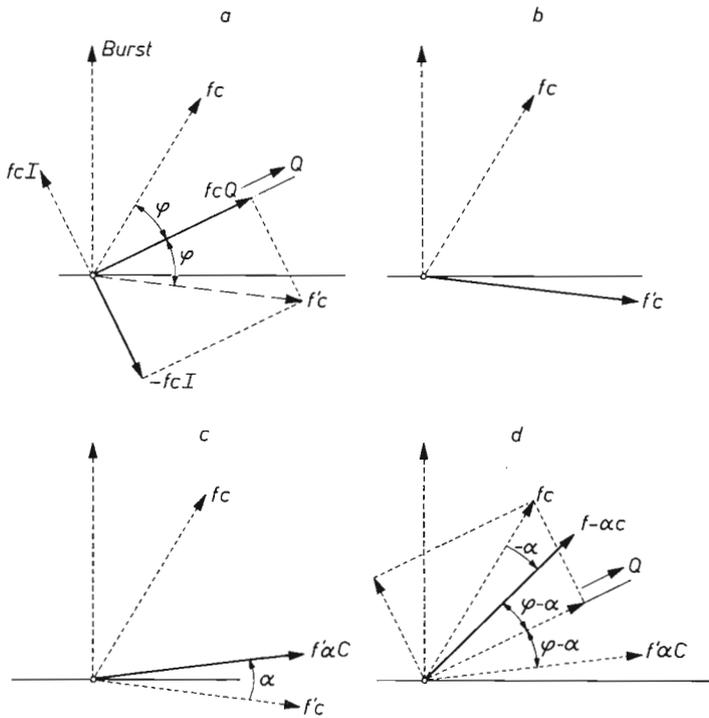


Figura 55. - Rapporti di fase dei segnali con errori differenziali di fase quando la componente I della sottoportante di crominanza è « riflessa » sull'asse Q , secondo il sistema PAL (vedi Fig. 54). f_c (linea tratteggiata sottile) = sottoportante non riflessa; f'_c = sottoportante riflessa. Altri simboli come nella Fig. 54.

- a) Al codificatore.
- b) All'antenna trasmittente.
- c) All'antenna ricevente.
- d) Dopo la seconda riflessione nel decodificatore del ricevitore, l'errore di fase è in senso inverso ($-\alpha$) di quello della sottoportante non riflessa.

trasmettere viene riflesso ⁽¹⁾ in uno degli assi, per esempio l'asse Q , ogni seconda riga mediante un commutatore elettronico. Ciò si ottiene con una semplice inversione di fase della frequenza di sottoportante I (Fig. 55a). Questa sottoportante riflessa subisce durante la trasmissione la stessa rotazione di fase α della sottoportante non riflessa e giunge così al ricevitore come indica la Fig. 55c. Se si ripete ora nel ricevitore il segnale sull'asse Q dopo ogni seconda riga, la sottoportante ritornerà alla sua fase originaria se non vi sono errori di fase. Qualunque errore di fase osservato avrà ora segno opposto di quello della

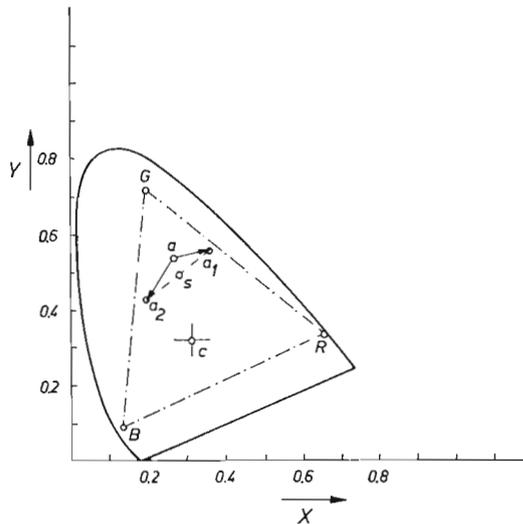


Figura 56. - Compensazione approssimata del sistema PAL semplice, basata sulla persistenza nella retina. a = punto di colore corretto nel diagramma di cromaticità; a_1, a_2 = punti di colore prodotti durante le righe alternate sullo schermo del ricevitore in presenza di un errore di fase nella sottoportante (riflessa e non riflessa); s = media di a_1 e a_2 , formata dall'occhio e che differisce solo di poco dal valore corretto α .

sottoportante non riflessa della Fig. 54. Ciò è spiegato nella Fig. 55d mediante il vettore di fase originario della sottoportante (linea tratteggiata sottile) e le sue componenti originarie.

Un'idea ovvia era di combinare le sottoportanti di Figg. 54c e 55c con i loro errori di fase « coniugati » per annullare questi ultimi. Il

⁽¹⁾ Dal punto di vista matematico, il segnale di sottoportante ricevuto è il coniugato complesso del segnale originario.

modo più semplice per giungere a ciò consiste nel rappresentare, sullo schermo del cinescopio e in rapida successione le immagini ottenute dalle due sottoportanti, utilizzando la persistenza della retina: i colori alterati corrispondenti agli errori di fase coniugati si alternano così rapidamente che l'occhio non può seguirli ma percepisce una tinta intermedia fra essi, corrispondente più o meno al colore originario. Questa compensazione approssimata dei due errori di fase è rappresentata nel diagramma di cromaticità nella Fig. 56.

Non si potrà avere una compensazione totale se non quando la relazione fra il sistema di coordinate su cui è tracciata la sottoportante e quello su cui è tracciato il diagramma di cromaticità è lineare.

In pratica questo metodo di compensazione è molto conveniente per errori di fase che possono giungere fino a circa 25°; al di sopra,

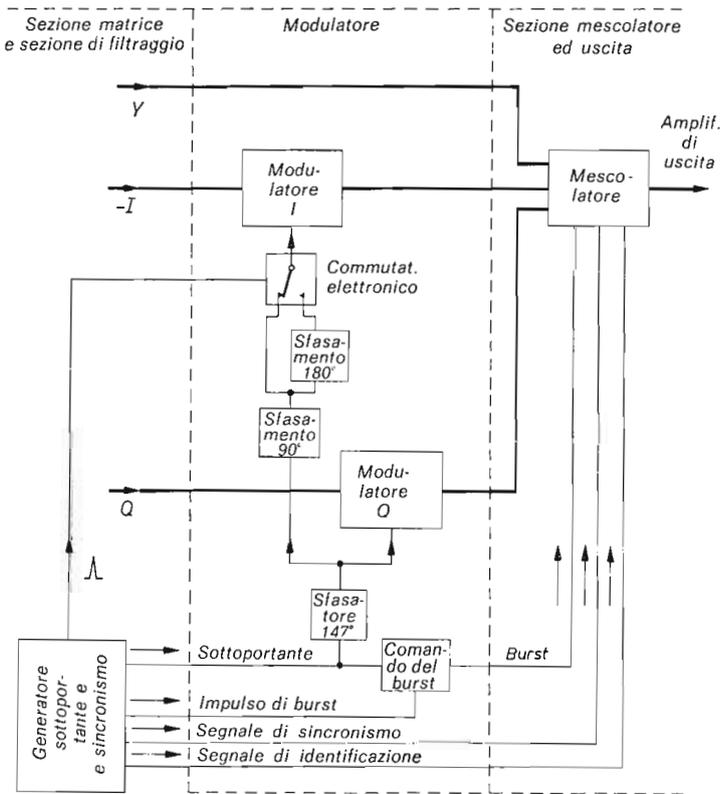


Figura 57. - Aggiunta a un codificatore NTSC per ottenere un codificatore PAL (vedi Fig. 50).

po tutt'al più due righe; ma nel sistema PAL tutto il resto delle righe fino al successivo ritorno verticale avrà il segnale I sfasato di 180° .

Le Figg. 57 e 58 mostrano, sotto forma di schemi a blocchi, le aggiunte che debbono essere fatte rispettivamente al codificatore e decodificatore NTSC per poter essere utilizzati con il sistema PAL.

Gli errori di fase coniugati possono essere compensati quasi perfettamente senza ricorrere alla persistenza della retina, se si aggiunge una precisa linea di ritardo nel decodificatore PAL, come mostra lo schema a blocchi della Fig. 59. La sottoportante f_c è divisa su tre canali: un canale a ritardo, che ritarda il segnale di un periodo di riga ($64 \mu s$), un canale senza ritardo f_{cQ} e un canale f_{cI} ugualmente senza ritardo, che inverte la fase del segnale f_c .

Il funzionamento di questo sistema è spiegato nella Fig. 60 mediante diagrammi di fase, che mostrano come uno degli stadi mescolatori della Fig. 59 produce la componente f_{cI} ($\pm 2 f_{cI}$) con fase alter-

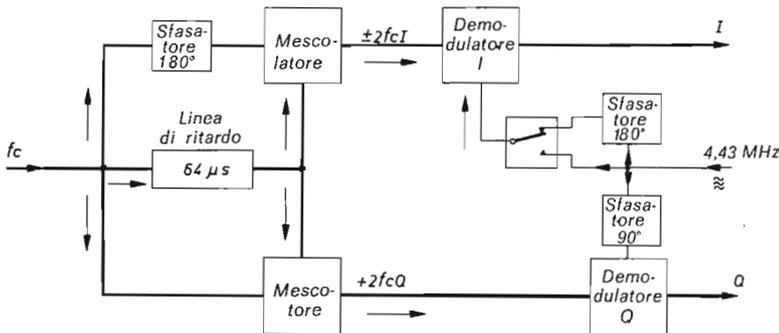


Figura 59. - Principio di un decodificatore PAL per la compensazione totale di un errore di fase.

nata e l'altro stadio produce la componente f_{cQ} ($\pm 2 f_{cQ}$) con fase costante. Le tre colonne da a a c di questa figura mostrano le relazioni di fase nei seguenti punti del decodificatore.

- alle entrate dei tre canali paralleli citati avanti;
- alle entrate dei due stadi mescolatori, con il canale f_{cI} in alto, il canale ritardato in mezzo e il canale f_{cQ} in basso;
- alle uscite dei due stadi mescolatori.

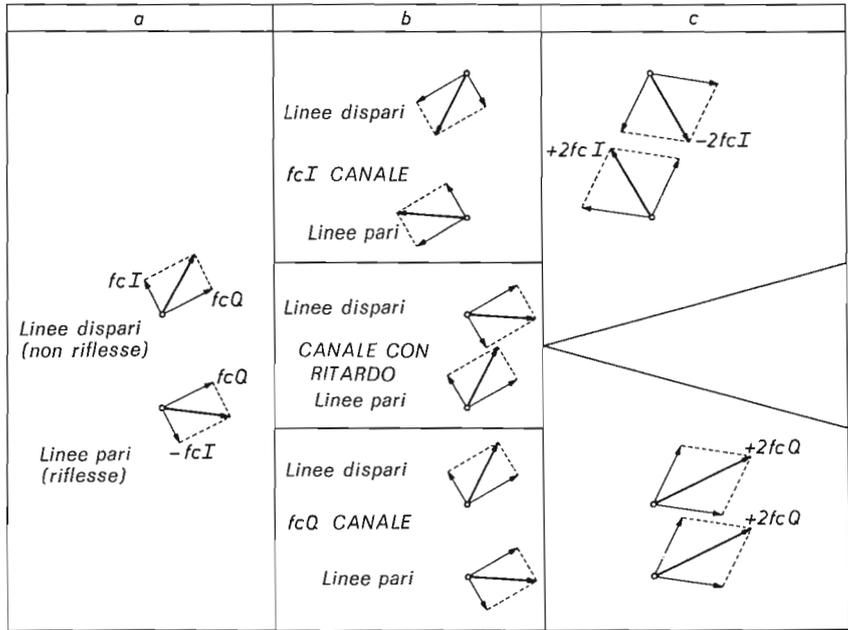


Figura 60. - Diagramma di fase per il circuito di Fig. 59 in assenza di errori di fase.

- a) Segnale incidente a sequenza di riga prima della sua ripartizione nei tre canali.
- b) Segnale nei tre canali prima dell'entrata negli stadi mescolatori nei tre canali, invertito nel canale f_{cI} , ritardato di un periodo di riga ($64 \mu s$) nel canale a ritardo e rimasto invariato nel canale f_{cQ} .
- c) Segnali alle uscite degli stadi mescolatori. In alto, somma dei canali f_{cI} e a ritardo; in basso: somma dei canali f_{cQ} e a ritardo. Nel canale f_{cI} le componenti f_{cQ} si annullano, mentre le componenti f_{cI} si annullano nel canale f_{cQ} .

Si vede chiaramente da questa figura che nello stadio mescolatore f_{cI} le componenti f_{cQ} si annullano sempre, mentre le componenti f_{cI} raddoppiano la loro ampiezza, dato che la fase si inverte ad ogni riga successiva; nel mescolatore f_{cQ} le componenti f_{cI} si annullano, lasciando le componenti f_{cQ} con ampiezza doppia e con fase costante (corretta).

L'inversione di fase della componente f_{cI} in righe alternate richiede la presenza del commutatore elettronico nel codificatore PAL, per invertire la fase della sottoportante per il demodulatore sincrono I in righe alterne, di modo che questo demodulatore dia sempre un segnale I con fase corretta.

La Fig. 60 dà le relazioni di fase per il caso ideale in cui non si produca nel corso della trasmissione alcun errore differenziale di fase. Se si presentano tali errori, essi vengono corretti dal circuito suddetto, come mostra la Fig. 61. In questa le relazioni di fase corrette e indicate sulla Fig. 60, sono riprodotte con linee sottili, per facilitare il confronto.

La Fig. 61 contiene anche una nuova colonna *d* che mostra i segnali *I* e *Q* ottenuti dai due demodulatori sincroni. In tale colonna *d* sono anche riportati i valori corretti di segnale con le fasi corrette (linee sottili); si vede che il rapporto delle ampiezze relative dei segnali *I* e *Q* nel segnale difettoso è lo stesso come nel segnale corretto, ma i loro valori assoluti sono più piccoli. Ciò significa che malgrado

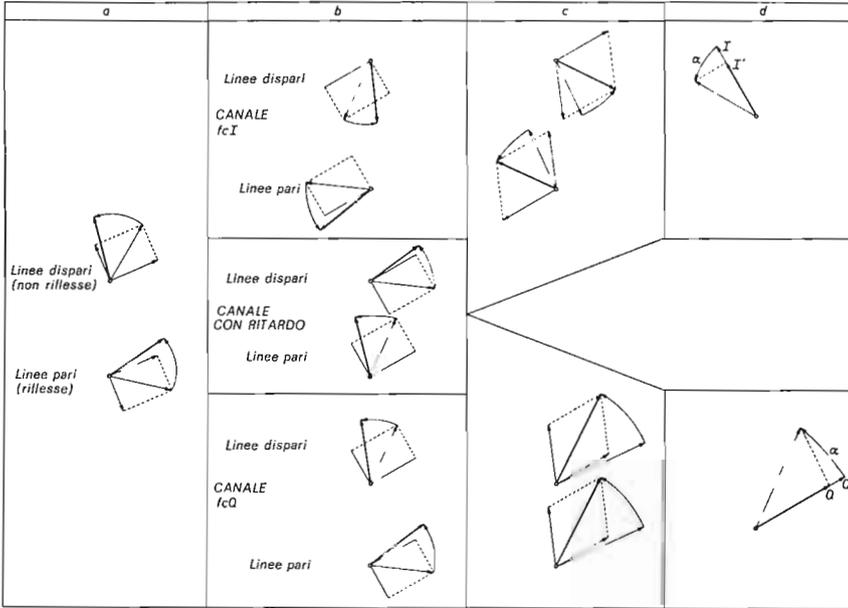


Figura 61. - Diagramma di fase per il circuito della Fig. 59 in presenza di un errore di fase. Le colonne *a*), *b*) e *c*) come nella Fig. 60. La colonna *d*) mostra la situazione di due demodulatori sincroni: la polarità alternata del segnale f_{cI} (vedere colonna *c*) è inutile a causa della inversione sequenziale delle righe del demodulatore *I*, di modo che non vi è alcuna differenza fra le righe pari e dispari nel canale f_{cI} come nel canale f_{cQ} . Dato che le componenti non corrette $2f_{cI}'$ e $2f_{cQ}'$ sono spostate tutte e due dello stesso angolo rispetto alle componenti corrette $2f_{cI}$ e $2f_{cQ}$, i segnali demodulati *I* e *Q* hanno ampiezze relative corrette ma ampiezze assolute leggermente ridotte. Si confronti questa demodulazione con la demodulazione normale NTSC rappresentata nella Fig. 54*d*.

l'errore introdotto, il colore rimane lo stesso, ma viene alquanto ridotta la saturazione.

Il sistema PAL con la sua doppia riflessione (nel codificatore e nel decodificatore) a sequenza di riga del segnale I sull'asse Q , compensa non solamente gli errori differenziali di fase, ma anche quelli dovuti alla diacromia fra i segnali I e Q .

Tali errori possono essere prodotti nei demodulatori sincroni quando le bande laterali delle componenti in quadratura non sono rigorosamente simmetriche. Nel sistema NTSC, una tale diacromia è sempre presente, benché in generale molto debole.

L'effetto di compensazione nel sistema PAL è così efficace che è anche possibile utilizzare una modulazione a banda laterale unica per i segnali di colore I e Q . Sarebbe allora possibile spostare la frequenza attuale della sottoportante (circa 4,43 MHz) all'estremità del canale video, ossia su circa 5 MHz ⁽¹⁾.

Non si deve dimenticare che i vantaggi suddetti del sistema PAL sono alquanto costosi. In particolare nel ricevitore vi è il costo apporato dalla linea di ritardo (che deve essere molto più precisa rispetto a quella del sistema SECAM ⁽²⁾) e dal commutatore elettronico che, con la sua sincronizzazione di fase rappresenta una parte piuttosto considerevole.

Tuttavia, il decodificatore PAL modificato presenta lo stesso difetto fondamentale del decodificatore SECAM, ossia la combinazione dell'informazione di colori di due righe successive; i contorni orizzontali e quasi orizzontali fra colori molto saturi vengono riprodotti particolarmente male, a causa dell'interlacciamento di riga.

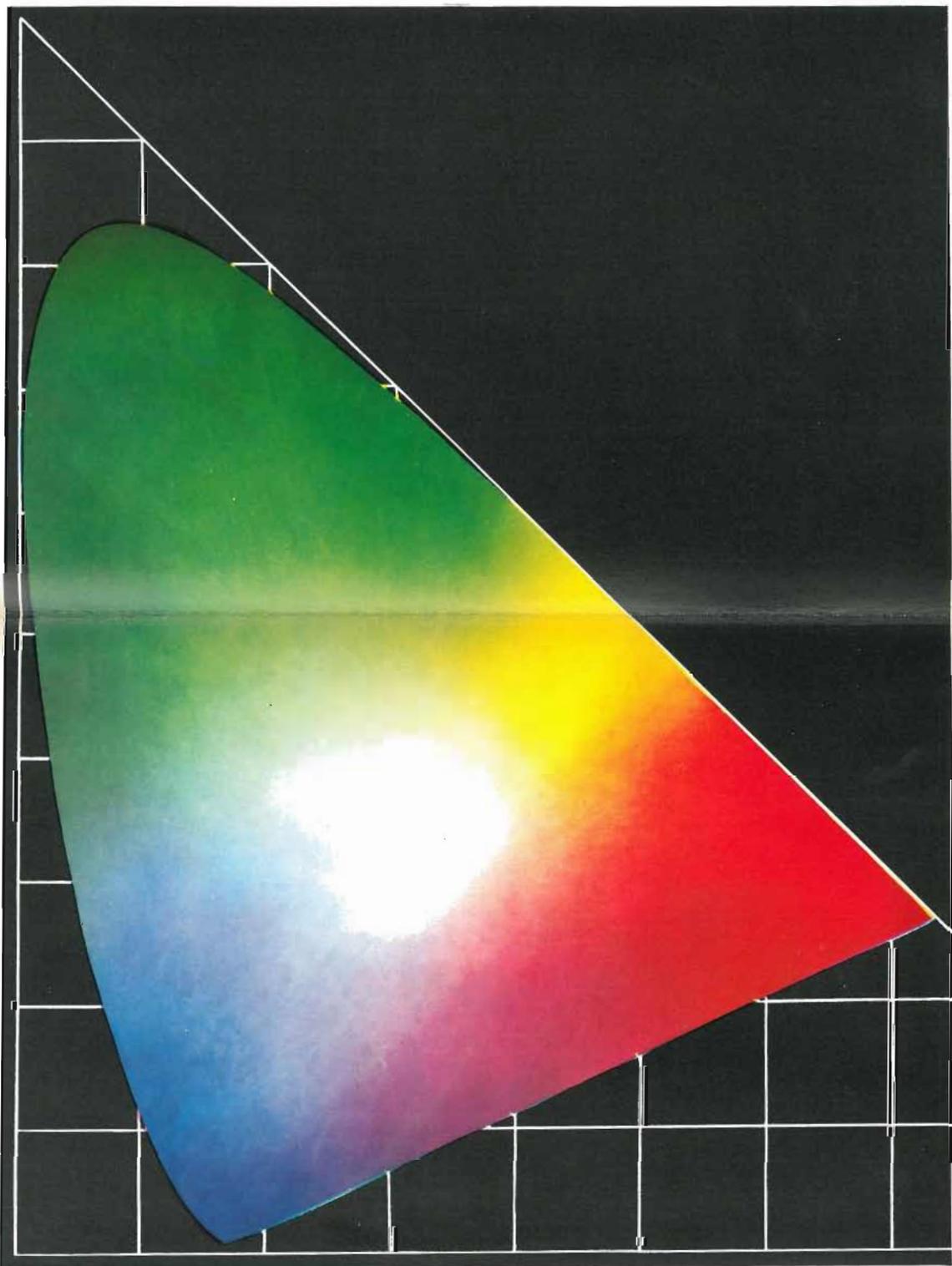
Vogliamo tuttavia citare anche due altri vantaggi del sistema PAL che potrebbero essere importanti per l'avvenire: la facilità con la

⁽¹⁾ Con una modulazione a banda laterale unica i due segnali di colore potrebbero essere trasmessi con la stessa ampiezza, ciò che permetterebbe di togliere la trasformazione dei segnali $(R-Y)$ e $(B-Y)$ in segnali I e Q , così come potrebbero essere tolte le linee di ritardo per il canale I nel codificatore e nel decodificatore.

⁽²⁾ Una linea di ritardo SECAM richiede una costanza di 25 ns, ossia lo 0,4 % del valore nominale, per poter ammettere uno spostamento di un quarto di elemento di immagine; invece, la linea di ritardo PAL deve restare costante entro il limite di circa 2,5 ns, ossia 0,04 % del valore nominale, a causa delle ristrette esigenze di fase della frequenza della sottoportante ritardata.

quale esso può essere trasformato nel sistema NTSC (scambi di programmi) e la possibilità di registrazione magnetica con una apparecchiatura leggermente meno complicata di quella per il sistema NTSC.

Le prove pratiche mostrano che il sistema PAL è superiore ai due altri quando le condizioni di ricezione sono molto cattive, ma non si è sufficientemente esaminato questo problema fino a consentire finora una scelta definitiva fra questo sistema e gli altri.



Edizioni C. E. L. I.
BOLOGNA

PREZZO NETTO
L. 3 000

